COLLECTION PAYOT

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

PAR

ÉDOUARD BRANLY

MEMBRE DE L'INSTITUT

621.384
B82

COLLECTION PAYOT

LE VOLUME RELIÉ : 4 FRANCS.

La **COLLECTION PAYOT** embrassera l'ensemble des connaissances humaines et formera une

Encyclopédie française de haute culture

constamment tenue à jour par la publication de volumes nouveaux dus à la plume des savants et des spécialistes les plus éminents.

La **COLLECTION PAYOT** se propose de mettre à la portée de chacun les principes fondamentaux et les faits essentiels dans toutes les branches du savoir humain. Elle permettra par ses exposés accessibles, clairs et précis, aux personnes instruites que les nécessités de la vie ont obligées à se spécialiser, d'être au courant des plus récentes acquisitions de la science et de l'érudition moderne.

Les ouvrages de la **COLLECTION PAYOT** sont conçus de manière à fournir, dans toutes les matières, à la fois une initiation pour les jeunes gens, une lecture d'un passionnant intérêt pour le grand public cultivé et un précis pour les spécialistes eux-mêmes.

N° 1. ÉDOUARD MONTET
Professeur de langues orientales à l'Université de Genève, ancien Recteur
L'ISLAM

N° 2. CAMILLE MAUCLAIR
LES ÉTATS DE LA PEINTURE FRANÇAISE DE 1850 A 1920

N°s 3-4. RENÉ CANAT
Docteur ès-lettres, Professeur de rhétorique supérieure au Lycée Louis-le-Grand
LA LITTÉRATURE FRANÇAISE AU XIXe SIÈCLE
2 tomes. — Tome I (1800-1852) ; Tome II (1852-1900)

N° 5. LOUIS LEGER
Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France
LES ANCIENNES CIVILISATIONS-SLAVES

N° 6. PAUL APPELL
Membre de l'Institut
Recteur de l'Université de Paris
ÉLÉMENTS DE LA THÉORIE DES VECTEURS ET DE LA GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE

N° 7. Ct DE CIVRIEUX
LA GRANDE GUERRE (1914-1918)
APERÇU D'HISTOIRE MILITAIRE

N° 8. HENRI CORDIER
Membre de l'Institut
LA CHINE

N° 9. ERNEST BABELON
Membre de l'Institut, Conservateur du cabinet des Médailles
Professeur au Collège de France
LES MONNAIES GRECQUES
APERÇU HISTORIQUE

N° 10. GEORGES MATISSE
Docteur ès-sciences
LE MOUVEMENT SCIENTIFIQUE CONTEMPORAIN EN FRANCE
I. — LES SCIENCES NATURELLES

N° 11. Dr PIERRE BOULAN
Chef du service de radiologie et d'électrothérapie
à l'hôpital de Saint-Germain
LES AGENTS PHYSIQUES ET LA PHYSIOTHÉRAPIE

N° 12. HIPPOLYTE LOISEAU
Professeur de langue et de littérature allemandes à l'Université de Toulouse
LE PANGERMANISME
CE QU'IL FUT — CE QU'IL EST

N° 13. ÉMILE BRÉHIER
Maître de conférences à la Sorbonne
HISTOIRE DE LA PHILOSOPHIE ALLEMANDE

N° 14. E. ARIÈS
Correspondant de l'Institut
L'ŒUVRE SCIENTIFIQUE DE SADI CARNOT
INTRODUCTION A L'ÉTUDE DE LA THERMODYNAMIQUE

N° 15. MAURICE DELAFOSSE
Ancien Gouverneur des Colonies, Professeur à l'École coloniale et à l'École des Langues Orientales
LES NOIRS DE L'AFRIQUE

N° 16. AUGUSTIN CARTAULT
Professeur honoraire de poésie latine à l'Université de Paris
LA POÉSIE LATINE

N° 17. L. MAQUENNE
Membre de l'Institut, Professeur au Muséum d'Histoire naturelle
PRÉCIS DE PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

N° 18. Dr G. CONTENAU
Chargé de Missions archéologiques en Syrie
LA CIVILISATION ASSYRO-BABYLONIENNE

N° 19. H. LECHAT
Professeur à l'Université de Lyon
Correspondant de l'Institut
LA SCULPTURE GRECQUE

N° 20. H. ANDOYER
Membre de l'Académie des Sciences et du Bureau des longitudes, Professeur à la Sorbonne
L'ŒUVRE SCIENTIFIQUE DE LAPLACE

N° 21. JEAN BECQUEREL
Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle
EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE DE LA THÉORIE D'EINSTEIN ET DE SA GÉNÉRALISATION
SUIVI D'UN APPENDICE A L'USAGE DES MATHÉMATICIENS

M. ÉDOUARD BRANLY

M. Édouard BRANLY est né à Amiens, le 23 octobre 1844. Il fit des études littéraires au Lycée de Saint-Quentin. Après avoir suivi les cours de Mathématiques spéciales au Lycée Henri IV, il fut admis en 1865 à l'École Normale Supérieure. Licencié ès Sciences Mathématiques et licencié ès Sciences Physiques en 1867, agrégé de l'Université à sa sortie de l'École Normale en 1868, il fut pendant quelques mois professeur au lycée de Bourges. Chef des travaux, puis Directeur-Adjoint du laboratoire d'Enseignement de la Physique à la Sorbonne, il fut reçu Docteur ès Sciences en 1873. Il accepta, à la fin de l'année 1875, de devenir Professeur de Physique à l'Université Catholique de Paris, où de grandes facilités pour des recherches personnelles étaient promises. Il arriva qu'il ne fut en mesure de reprendre ses travaux scientifiques que vers 1885, dans des conditions difficiles. Après des essais relatifs à l'emploi du thermomultiplicateur, il s'occupa de la déperdition de l'électricité et à cette occasion, des conductibilités électriques des corps isolants. C'est en 1890 et 1891 qu'il publia, à la suite d'études prolongées, sa découverte de la conductibilité intermittente des radio-conducteurs et de la fermeture à distance d'un circuit de pile, sous l'influence d'une étincelle de décharge de condensateur. La répétition de ces expériences spéciales, avec les mêmes radio-conducteurs, entre des stations de plus en plus éloignées, a permis plus tard la réalisation de la télégraphie sans fil

Lauréat de l'Académie des Sciences en 1898, Grand Prix à l'Exposition Universelle de 1900, Chevalier de la Légion d'honneur avec la mention au *Journal Officiel* « a découvert le principe de la Télégraphie sans fil », auréat de la Société d'Encouragement à l'Industrie nationale qui lui décerna en 1910 son prix d'Argenteuil, M. BRANLY fut élu en 1911 membre de l'Institut de France dans la Section de Physique de l'Académie des Sciences. Il était depuis 1910 membre associé de l'Académie Royale de Belgique. Officier de la Légion d'honneur en 1920.

Parmi les publications de M. BRANLY, nous mentionnerons les suivantes:

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES DANS LES PILES (Thèse de Doctorat ès Sciences, mars 1873).

DOSAGE DE L'HÉMOGLOBINE DANS LE SANG PAR LES PROCÉDÉS OPTIQUES (Thèse de Doctorat en Médecine, juin 1882).

Dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences :

DÉPERDITION DES DEUX ÉLECTRICITÉS DANS L'ÉCLAIREMENT PAR DES RADIATIONS TRÈS RÉFRANGIBLES.

DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA LUMIÈRE DIFFUSE, A L'OBSCURITÉ.

CONDUCTIBILITÉ DES RADIOCONDUCTEURS (tubes à limaille, divers contacts imparfaits).

RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES AU CONTACT DE DEUX MÉTAUX.

UNE ENVELOPPE MÉTALLIQUE NE SE LAISSE PAS TRAVERSER PAR DES RADIATIONS DE COURTE LONGUEUR D'ONDE.

DISTRIBUTION ET CONTROLE D'EFFETS PRODUITS A DISTANCE PAR LES ONDES ÉLECTRIQUES.

DISPOSITIFS DE TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL PRÉSENTÉS DANS UNE CONFÉRENCE AU TROCADÉRO EN 1905.

APPAREILS DE SÉCURITÉ CONTRE DES ÉTINCELLES PERTURBATRICES.

RECHERCHES SUR LE MÉCANISME DE LA CONDUCTIBILITÉ DES CONTACTS IMPARFAITS.

On doit à M. BRANLY plusieurs Traités de Physique.

COLLECTION PAYOT

ÉDOUARD BRANLY
MEMBRE DE L'INSTITUT

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

PAYOT & Cie PARIS
106, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1922
Tous droits réservés

TK5742
.B75

TABLE DES MATIÈRES

LES PREMIÈRES TÉLÉGRAPHIES..... 5

NOTIONS D'ÉLECTROMAGNÉTISME..... 9

AIMANTS..... 9
PILES ÉLECTRIQUES ET COURANT ÉLECTRIQUE..... 12
ÉLECTROSTATIQUE..... 19
INDUCTION..... 25
Induction mutuelle..... 26
Représentation graphique des courants..... 28
Caractères des courants alternatifs périodiques..... 30
Self-induction..... 32
Loi générale de l'induction..... 33
Rôles d'un condensateur et d'une sp ra.e de self-induction dans un circuit de courant alternatif..... 33
APPAREILS USUELS..... 35
Sonnerie électrique..... 35
Téléphone..... 37
Bobine d'induction..... 40
Transformateurs..... 41
Télégraphie électrique avec fil de ligne..... 43
Téléphonie..... 47
Télémécanique par fil conducteur..... 48
Télégraphie optique..... 50

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL..... 53

NATURE D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE..... 55
Expériences de Feddersen..... 55
Expériences de Hertz..... 57
Classement des vibrations de l'éther..... 63

WITHDRAWN FROM THE LIBRARY

ORIGINE DE LA RADIOTÉLÉGRAPHIE 65
Radioconducteurs 66
Généralités sur les contacts imparfaits 73

PREMIERS ESSAIS DE RADIOTÉLÉGRAPHIE 77
Excitation directe 78
Poste d'émission 78
Poste de réception 80
Inscription 83
Réception au son par téléphone 84

CONDITIONS D'ACCORD DE DEUX POSTES 87
Rôle des antennes 88
Rôle des cadres 91
Circuits oscillants et résonance 92
Systèmes oscillants 92
Résonance 93
Avantages de la résonance électrique 96
Influence de l'amortissement sur la résonance 97
Imperfections de l'excitation directe 101
Excitation indirecte 102
Dédoublement de la radiation d'émission 105
Longueur d'onde d'émission 107
Formes des antennes 108
Excitation indirecte avec choc 110
Éclateur tournant 112
Étincelles fréquentes ou musicales 114
Accroissement de la vitesse de transmission 116
Mécanisme d'émission rapide 116
Réception par enregistrement 116
Résultats de la télégraphie par étincelles 118

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL PAR ONDES ENTRETENUES 121
Tikker 122
Hétérodyne 123

3173

Ondes entretenues des machines alternatives.. 125
Lampe à deux électrodes..... 127
Lampe à trois électrodes..... 129
Usages de la lampe à trois électrodes..... 132
Lampe à trois électrodes servant d'amplificateur 133
Lampe à trois électrodes servant de détecteur.. 136
Lampe à trois électrodes générateur d'ondes entretenues 138

TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL..... 142

TÉLÉPHONIE SANS FIL..... 145

DIRECTION D'UN RAYONNEMENT ÉLECTRIQUE..... 149

Antennes..... 150
Cadres..... 151

LE PRÉSENT ET L'AVENIR DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL..... 155

Sécurité apportée à la navigation..... 157
Signaux horaires..... 158
Renseignements météorologiques..... 160
Etudes météorologiques..... 161
Télégraphie sans fil en temps de guerse..... 161
Rôle comparé des deux télégraphies..... 162
Mesures de contrôle..... 163

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays
Copyright 1922, *by Payot & Cie*

LES PREMIÈRES TÉLÉGRAPHIES

Une transmision instantanée de messages à distance se nomme une *télégraphie*. Dès les temps les plus reculés, entre des localités parfois éloignées, mais restant en vue, des nouvelles s'échangeaient optiquement, au moyen de signaux conventionnels, tels que feux allumés, déplacements d'objets apparents. Ces antiques procédés ne furent que très lentement perfectionnés. A la fin du XVIIIe siècle, on regardait comme un grand progrès une manœuvre visible de pièces de bois de diverses formes. Dans ce système de *télégraphie aérienne*, dû à *Claude Chappe*, resté en usage en France, dans certains cas, jusqu'au milieu du XIXe siècle, chaque signal était répété de proche en proche entre des postes échelonnés, distants en moyenne de dix kilomètres. Ce procédé, peu rapide, n'était applicable qu'en temps clair.

Au début du XIXe siècle, la merveilleuse découverte de la *pile de Volta* pouvait faire entrevoir pour les communications lointaines des ressources inattendues. L'utilisation des divers effets du courant électrique était de nature à donner naissance à différents systèmes de télégraphie électrique. C'est ainsi que vers 1835, notre télégraphie électrique usuelle fut organisée avec la plupart de ses avantages actuels. Depuis lors, par un fil métallique qui réunit deux points quelconques du globe terrestre, une correspondance presque instantanée est expédiée à toute

heure, la nuit comme le jour, sans souci des variations météorologiques. Les fils de circulation des dépêches couvrent d'un réseau serré toutes les régions habitées. Protégés par une enveloppe isolante, ils traversent les mers, ils contournent les montagnes, ils assurent pratiquement le secret. Suspendus à quelques mètres au-dessus du sol, le long des routes, ils nous sont familiers, et, jusqu'à ces dernières années, nous les estimions indispensables.

Il y avait, pourtant, des cas où cette télégraphie était impraticable. Sur un navire qui s'éloigne, peut-on songer à dérouler un fil qui conserve une attache avec le port de départ? Les seules télégraphies possibles, dans ces circonstances, ne pourraient être que des télégraphies sans fil de liaison et l'intervention de l'un des éléments apparents dans lesquels le navire est plongé, air ou eau, avait été seule envisagée. Or, par l'air ou par l'eau, un son ne reste jusqu'ici perceptible que sur un nombre fort restreint de kilomètres. D'autre part, si, à travers une atmosphère très pure, des phares lumineux s'aperçoivent d'assez loin la brume réduit parfois outre mesure leur rayonnement, et, en tout cas, la convexité de notre globe limite forcément leur portée. En dehors des *télégraphies acoustiques et optiques*, on attend peu de certaines télégraphies électriques sans fil de liaison qui empruntent l'eau ou le sol comme intermédiaire, car l'absorption par le milieu de transmission restreint très vite la propagation.

La *télégraphie sans fil de ligne* dont il sera question ici, est électrique ; mais la nature spéciale de son milieu de transmission lui confère des propriétés exceptionnelles. Malgré la dissémination à travers l'espace de son énergie initiale, grâce à la sensibilité surprenante des appareils de réception, elle fonctionne à toute distance comme la télé-

graphie électrique usuelle. Elle est rayonnante à la façon de la télégraphie optique : c'est à elle toutefois que l'importance de son rôle actuel a fait réserver la dénomination de *radiotélégraphie*.

Comme cette nouvelle télégraphie, née il y a un quart de siècle, a emprunté à la télégraphie électrique usuelle avec fil de ligne certains dispositifs de son fonctionnement, son étude sera facilitée par la comparaison des deux télégraphies. D'autre part, afin d'éviter au lecteur des incertitudes pour la définition et l'adaptation d'expressions techniques, un rapide exposé des phénomènes physiques qui interviennent dans les deux modes de transmission sera préalablement présenté.

NOTIONS D'ÉLECTROMAGNÉTISME

AIMANTS

Les *aimants* usuels sont des barreaux d'acier auxquels on a donné la propriété d'attirer le fer. Cette attraction s'exerce surtout par deux régions polaires, voisines de leurs extrémités.

Un aimant qu'on soutient par son centre de gravité pour le soustraire à l'action de son poids (fig. 1), prend, en un même lieu, une direction fixe, imposée par deux forces égales, parallèles entre elles, et de sens contraires, nommées *forces magnétiques terrestres*, qui lui sont appliquées en deux points déterminés. Les points d'application de ces deux forces, situés dans les régions polaires de l'aimant, sont spécialement appelés ses *pôles*. La ligne qui joint les deux pôles, dite *axe magnétique* du barreau, s'oriente suivant la direction de la force magnétique terrestre du lieu.

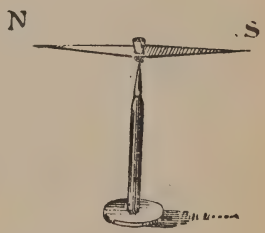

Fig. 1

On appelle *méridien magnétique* d'un lieu le plan vertical qui contient la direction de la force magnétique terrestre en ce lieu. Une aiguille aimantée mobile horizontalement au-dessus d'un cercle divisé constitue une *boussole*.

L'axe magnétique d'un aimant se dirige à peu près du Nord au Sud. L'extrémité N qui pointe vers le Nord est toujours la même, elle contient le *pôle nord*. Le *pôle sud* est à l'extrémité opposée S. Si deux aimants sont mis en présence, leurs pôles respectifs de même nom exercent l'un sur l'autre une action répulsive ; les pôles de noms contraires s'attirent.

Un espace dans lequel s'exercent des forces magnétiques est qualifié *champ magnétique*. Un champ magnétique est dit *uniforme* quand, en tous ses points, la résultante des forces magnétiques est constante en grandeur et en direction. En tout espace assez restreint, le champ magnétique terrestre est uniforme. La trajectoire que suivrait un pôle nord, supposé libre d'obéir à la force magnétique en tout point d'un champ magnétique, s'appelle *ligne de force magnétique*. Un pôle sud suivrait la même trajectoire en sens inverse. L'axe magnétique d'une courte aiguille aimantée, libre, s'oriente en chaque point d'un champ magnétique suivant la ligne de force qui passe par ce point. Souvent, on ne représente pas une force magnétique, $F = nf$ par n longueurs égales à l'unité de force f, portées bout à bout dans le sens de la force (fig. 2) ; il est commode de la représenter, par n longueurs parallèles, ayant la grandeur et la direction de f, et distribuées uniformément sur une surface de un centimètre carré perpendiculaire à la direction de la force. L'ensemble de ces forces parallèles est nommé un *flux de force*. Quand une force F agit

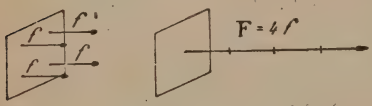

Fig. 2.

uniformément sur une surface S, perpendiculaire à sa direction, son flux à travers cette surface est SF. Dans un champ magnétique uniforme, le flux de force magnétique est formé de lignes de force parallèles et équidistantes.

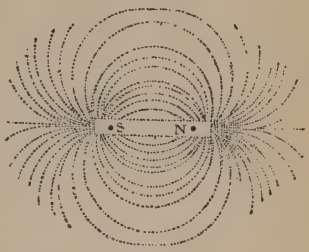

Fig. 3.

Les lignes de force, qui relient à travers le milieu ambiant la région nord d'un barreau à sa région sud, peuvent être représentées matériellement par des files de grains de limaille de fer qui se distribuent d'une façon régulière autour du barreau et forment ce que l'on appelle un *spectre magnétique* de l'aimant (fig. 3). On a été amené à imaginer que ces lignes ne s'arrêtent pas à la surface du barreau, mais se continuent dans la masse même du métal, en allant de sa région sud à sa région nord (fig. 4). Les lignes de force forment ainsi des courbes fermées.

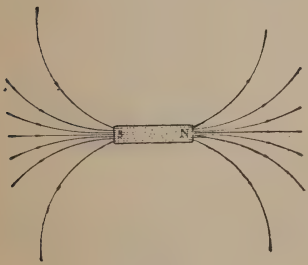

Fig. 4.

PILES ÉLECTRIQUES ET COURANT ÉLECTRIQUE

Un *élément de pile* consiste en deux lames de métaux différents, cuivre et zinc, par exemple, partiellement plongées dans un liquide (fig. 5) qui exerce sur elles des actions chimiques inégales. Si, en dehors du liquide, les deux lames sont reliées par un fil métallique (fig. 6), le circuit fermé que constituent

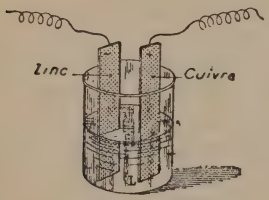

Fig. 5.

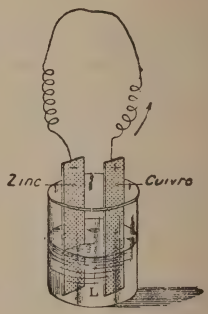

Fig. 6.

la première lame, le fil extérieur, la seconde lame, puis le liquide compris entre les deux lames, devient le siège de phénomènes spéciaux, dits phénomènes de *courant électrique*. Ce nom provient de ce que les effets observés s'énoncent aisément en imaginant dans le circuit fermé une circulation analogue à celle d'un fluide liquide ou gazeux. En suivant le conducteur extérieur à l'élément, on convient de considérer ce courant spécial comme allant du *pôle* dit *positif*, qui est le métal le moins attaqué à l'autre

métal, qui est le *pôle négatif*, pour regagner le pôle positif en traversant le liquide [1]. Le courant a circulé à travers une suite ininterrompue de corps dits *bons conducteurs*. Les métaux, l'eau, les solutions de sels métalliques sont des corps bons conducteurs. Des corps dits *isolants*, tels que l'air, les résines, le verre, arrêtent le courant électrique. L'interruption du courant par l'introduction d'un isolant en un point de son circuit fait dire que le circuit est *ouvert*. Dans le circuit *fermé* que parcourt un courant électrique, on admet que la matière transportée, appelée *électricité*, est formée de corpuscules matériels extrêmement petits qui sont poussés par une *force électromotrice*, de la même façon qu'un liquide est poussé par une pression, dans une conduite qui réunit deux vases où les niveaux sont différents. Une différence de niveau électrique, ou *différence de potentiel*, déterminée par la nature des métaux et du liquide de l'élément, est la cause de la force électro-motrice.

Tant que le circuit d'un élément de pile reste *ouvert*, l'élément ne change pas ; il est au contraire modifié dans sa constitution chimique quand un courant électrique vient à parcourir son circuit, alors que ce circuit est fermé.

L'observation des effets d'un courant électrique dans le circuit fermé d'un élément de pile a montré que les diverses sections transversales du circuit conducteur sont toutes traversées simultanément par une *même quantité* d'électricité. La quantité d'électricité qui traverse par seconde chaque section est appelée *intensité* du courant. L'intensité du courant est, à chaque instant, proportionnelle à la différence de potentiel des deux pôles ; elle est affaiblie par une *résistance* au transport de l'électricité, que chaque

1. Dans l'élément de Volta, le métal positif était le cuivre et le métal négatif était le zinc. Le liquide L était de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique.

portion du circuit oppose séparément. La résistance totale du circuit est la somme des résistances partielles. La résistance d'un conducteur varie avec sa nature ; elle croît avec sa longueur et diminue quand sa section augmente. Le cuivre est le métal usuel le moins résistant ; les liquides de l'élément, tout en étant conducteurs, sont beaucoup plus résistants que les métaux.

L'intensité I se mesure en *ampères*, la force électromotrice ou la différence de potentiel E en *volts*, la résistance R en *ohms*. La loi de l'intensité, d'un courant *constant*, appelée loi d'Ohm ou loi de Pouillet, a pour expression $I = \frac{E}{R}$.

Dans les applications de l'électricité, il est souvent avantageux de grouper plusieurs éléments. Dans le groupement, dit *en série*, on joint par un court conducteur le pôle négatif d'un premier élément au pôle positif d'un second, puis le pôle négatif du second au pôle positif d'un troisième... Le tout forme une pile d'éléments que l'on nomme d'ordinaire, pour abréger, une *pile*. Le pôle positif du premier élément est le pôle positif de la pile, le pôle négatif du dernier est le pôle négatif de la pile. On ferme le circuit en réunissant les pôles extrêmes par les conducteurs que l'on veut faire traverser par le courant. Pour un élément unique ou pour une pile d'éléments, le sens du courant est le sens du pôle positif au pôle négatif dans la partie extérieure du circuit. La loi d'Ohm s'applique à une pile. Quand une pile est formée de *n* éléments en série, les forces électromotrices des *n* éléments s'ajoutent. Si les éléments ont la même constitution et la même force électromotrice individuelle E, la loi d'Ohm s'écrit :

$I = \frac{nE}{R}$, I est l'intensité, R est la somme des résistances des *n* éléments et du circuit extérieur.

Un courant électrique exerce dans son propre circuit certaines actions qu'on peut appeler *actions intérieures*. Les principales actions intérieures sont des réactions chimiques et l'échauffement des conducteurs du circuit. Un courant exerce aussi, en dehors de son circuit, des actions qu'on appelle *actions extérieures*. Ces actions extérieures sont des effets magnétiques qui sont particulièrement intéressantes en télégraphie. Elles ont eu pour point de départ une expérience due au physicien danois Œrsted.

Œrsted, en 1819, découvrit qu'un fil métallique, tendu parallèlement à une aiguille aimantée NS, libre et en repos, la fait dévier quand il vient à être parcouru par un courant électrique (fig. 8). On exprime ce fait en disant qu'un courant électrique crée, autour de lui, un *champ magnétique*.

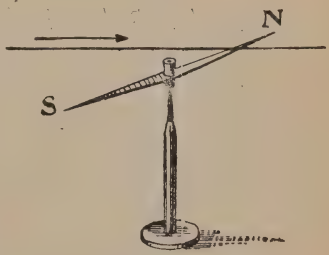

Fig. 8.

Ampère a su produire, avec les courants, des systèmes, appelés *solénoïdes*, qui se comportent comme des aimants. On réalise un solénoïde en faisant circuler un courant électrique dans des spires formées d'un fil conducteur, enroulées parallèlement sur un cylindre. S'il est libre de se mouvoir, un solénoïde s'oriente comme un aimant dont l'axe est l'axe du solénoïde. Une de ses extrémités se dirige vers le nord, l'autre extrémité

se dirige vers le sud ; aussi appelle-t-on respectivement pôle nord et pôle sud les extrémités d'un solénoïde. Les pôles de même nom de deux solénoïdes mobiles se repoussent, comme les pôles de même nom de deux aimants : les pôles de noms contraires s'attirent.

L'espace qu'entourent les spires d'un solénoïde est traversé par un flux de force magnétique, parallèle à l'axe du solénoïde (fig. 9). Chacune des lignes de ce flux se ferme en sortant par le pôle nord pour rentrer par le pôle sud.

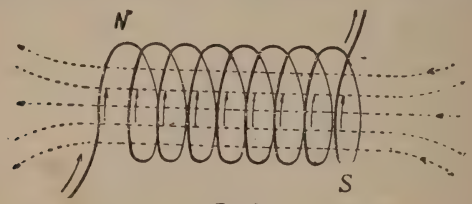

Fig. 9.

Une aiguille aimantée, libre, se dirige suivant une ligne de force, à l'intérieur comme à l'extérieur du solénoïde fig. 10). De la limaille de fer dessine les lignes de force développées par un solénoïde de la même façon que les lignes de force d'un aimant.

Ampère, assimilant, inversement, un aimant quelconque à un solénoïde parcouru par un courant, appelait *courants de l'aimant* les courants d'un solénoïde équivalent à cet aimant.

En poursuivant les conséquences des analogies précédentes, deux règles importantes ont pu être énoncées : 1° un système magnétique, aimant ou courant, mobile dans un champ magnétique, se met en équilibre dans une position telle que son flux propre prenne la direction du

flux du champ magnétique · 2° un observateur, qui se place en face d'un pôle sud de solénoïde ou d'aimant, y

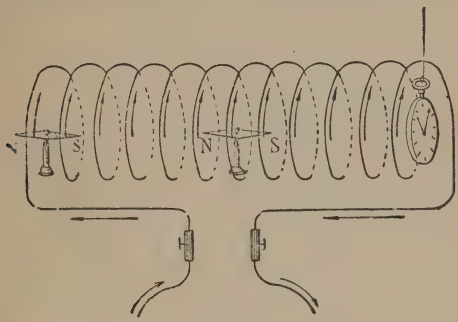

Fig 10.

voit le courant circuler dans le *sens direct* (de gauche à droite ou sens des aiguilles d'une montre (fig. 10).

Enfin, de même qu'un morceau de fer devient un aimant *temporaire* dans le champ magnétique d'un aimant, un noyau de fer introduit dans l'axe d'un solénoïde devient un

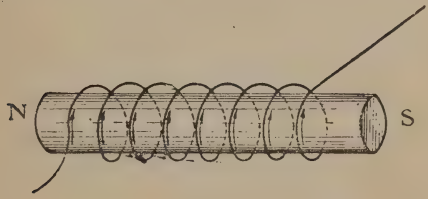

Fig. 11.

aimant pendant le passage du courant et son flux magnétique renforce le flux du solénoïde. L'aimantation de cet aimant,

dit *électroaimant*, (fig. 11). croît jusqu'à une certaine limite avec l'intensité du courant ; elle cesse complètement avec le courant, si le fer est *doux*, c'est-à-dire pur. Le solénoïde et le noyau aimanté ont un pôle de même nom à la même extrémité On utilise, dans de très nombreux appareils, l'aimantation temporaire des électroaimants.

Si, autour de l'aiguille d'une boussole et, dans le plan vertical dans lequel elle s'oriente au lieu de l'expérience, on enroule une ou plusieurs spires parallèles de fil conducteur formant un circuit dans lequel ne passe aucun courant, l'aiguille reste immobile. Mais quand on dirige un courant de pile dans les spires, l'aiguille est déviée, et elle l'est d'autant plus que le courant est plus intense. L'ensemble de l'aiguille et du cadre sur lequel les spires sont enroulées constitue un *galvanomètre* ou un *ampèremètre*.

Les effets magnétiques ne sont pas les seuls auxquels on s'adresse pour comparer entre eux les courants électriques ; c'est ainsi que dans l'étude de courants variables, on fait souvent usage *d'ampèremètres thermiques*.

ÉLECTROSTATIQUE

On avait constaté dans l'antiquité que l'*ambre* frotté attire les corps légers, tels que des barbes de plume, des feuilles d'or. On reconnut plus tard que la *résine* et le *verre* frottés possèdent la même propriété. Le corps frotté était dit *électrisé*. Au XVIIIe siècle, on découvrit que le frottement électrise tous les corps. Sur certains d'entre eux, dits *isolants*, l'attraction des corps légers n'a lieu que par les points frottés. Sur d'autres, dits *conducteurs*, la propriété attractive se montre sur toute la surface ; elle n'apparaît toutefois que sur un conducteur *isolé*, c'est-à-dire soutenu par un corps isolant. Un corps conducteur, isolé et électrisé, partage sa propriété attractive avec un autre corps conducteur isolé auquel on le réunit, soit par contact direct, soit par l'intermédiaire d'un fil conducteur, mais la propriété attractive diminue à mesure que s'accroît la surface totale ainsi électrisée. Une communication avec le sol, dont la surface peut être considérée comme infiniment grande, fait perdre immédiatement son électrisation à un corps conducteur électrisé.

Le frottement n'est pas le seul procédé d'électrisation. Quel que soit le procédé d'électrisation, les corps dits isolants restent isolants, les corps dits conducteurs restent également conducteurs et, en outre, *deux espèces d'électricité* apparaissent constamment à la fois : l'une, dite *vitrée* ou *positive*, est celle qui charge un baton de verre frotté avec de la laine ; l'autre, dite *résineuse* ou *négative*, est celle qu'on développe sur la résine frottée avec de la

laine. Dans ces frottements, la laine se charge négativement avec le verre, positivement avec la résine.

Deux corps chargés d'une même électricité se repoussent ; ils s'attirent, s'ils sont chargés d'électricités contraires.

Deux corps conducteurs, identiques, chargés d'une même électricité, sont dits *également chargés*, si dans les mêmes conditions de position et de distance, chacun d'eux attire également, un même corps léger. Deux conducteurs, chargés d'électricités contraires, sont dits *également chargés* par leurs électricités respectives, si, lorsqu'on les met en contact, ils deviennent *neutres*, ou non électrisés, comme le sol du lieu où ils se trouvent.

La pile est une source chimique d'électricité. Son courant convertit, pendant sa circulation, de l'énergie chimique en énergie électrique. Son pôle positif charge d'électricité vitrée ou positive un corps conducteur avec lequel il est mis en communication ; le même conducteur serait chargé d'électricité négative s'il était relié au pôle négatif. La charge de ce conducteur est, dans les deux cas, indépendante des dimensions des éléments de la pile ; elle est proportionnelle à leur nombre, lorsque ces éléments sont tous de même constitution et associés en *série*.

Quand on vient à réunir par un fil métallique les deux pôles d'une pile, les charges de signes contraires des pôles se réunissent par le fil et leur renouvellement continuel fait qu'un courant électrique parcourt constamment la pile elle-même et son circuit. Les effets de ce courant électrique ont été signalés précédemment.

Avant la découverte de la pile par Volta, les seules sources d'électricité étaient des *machines à frottement*. Développées en même temps en quantités égales, l'une sur le corps frotté, l'autre sur le corps frottant, les deux électri-

cités y sont recueillies séparément sur deux corps conducteurs, appelés *pôles*, qui offrent, comme les deux pôles d'une pile, une différence de potentiel.

Lorsque, pendant le fonctionnement d'une machine électrique, les deux pôles P et P' (fig. 12) ne sont séparés que par un assez petit intervalle d'air, les électricités contraires en présence, parviennent, en s'attirant, à vaincre la résistance de la couche d'air qui les sépare et une *étincelle* bruyante et lumineuse éclate brusquement. De petites particules métalliques, arrachées par l'étincelle à la matière des pôles, livrent, à travers l'intervalle d'air, un passage facile à un courant *momentané* de même nature qu'un courant de pile, qui neutralise les pôles en égalisant leurs potentiels électriques. Quand, par une nouvelle hausse de la différence de potentiel des deux pôles, due au fonctionnement ininterrompu de la machine, la résistance de l'intervalle d'air peut être, comme précédemment, surmontée, une nouvelle étincelle éclate. Les décharges successives sont des courants électriques intermittents, qui ont un sens constant, car les pôles de la machine gardent chacun leur signe électrique.

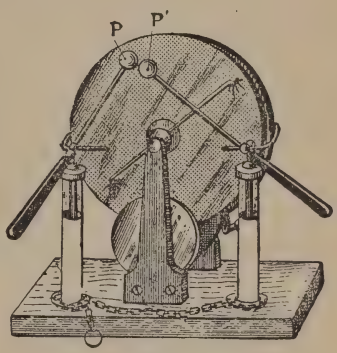

Fig. 12.

La différence de potentiel des deux pôles d'un élément de pile étant incomparablement plus faible que celle des

deux pôles d'une machine électrique, des étincelles n'éclateraient entre les pôles d'une pile que s'ils étaient extrêmement rapprochés et si la pile elle-même comprenait un très grand nombre d'éléments associés en série. Les étincelles se succéderaient alors sans interruptions.

Il résulte de ces comparaisons que le courant fourni par une pile ressemble à un courant liquide continu, de très faible pente et de puissant débit ; un courant de machine électrostatique est comparable à un filet liquide qui tombe, par saccades, d'une très grande hauteur.

L'analogie avec un cours d'eau se poursuit sur tout le parcours d'un circuit de courant électrique. De même que la hauteur du niveau du liquide au-dessus du niveau de l'embouchure diminue graduellement sur le cours d'un fleuve, le niveau électrique baisse dans le sens du débit sur le trajet d'un courant électrique.

Un réservoir vide qui est mis en communication avec un point d'un fleuve, se remplit d'une quantité de liquide qui est proportionnelle aux dimensions du réservoir et au niveau du fleuve en ce point. De la même façon, un corps conducteur, mis en communication avec un point d'un circuit de pile, prend une charge électrique proportionnelle, à la fois, au niveau électrique en ce point et à une grandeur nommée *capacité électrique* du conducteur.

Une source d'électricité sert souvent à charger un *condensateur*. Ce nom est donné à un ensemble de deux surfaces métalliques de même étendue, C et C′, parallèles, appelées *armatures*, séparées par une mince couche isolante (fig. 13). Quand on a réuni chacune des armatures d'un condensateur à un des pôles d'une source électrique, elle prend une charge de même signe et de même potentiel que le pôle auquel elle est réunie. En raison de l'attraction

mutuelle des deux électricités contraires qui sont en regard, de fortes quantités d'électricité s'accumulent sur les armatures si celles-ci sont très rapprochées. La charge de chacune d'elles se fait par un courant de faible durée dont l'intensité peut être mesurée à l'aide d'un *ampèremètre* intercalé sur le trajet d'un pôle à l'armature correspondante. Quelles que soient les dimensions du condensateur, la charge de chacune des armatures est proportionnelle à la différence des potentiels des pôles de la source. La *capacité* du condensateur, qui est, par définition, sa charge pour une différence de potentiel des deux pôles de la source égale à un volt, augmente avec la surface des armatures et avec leur rapprochement. Elle dépend aussi de la nature de la lame isolante.

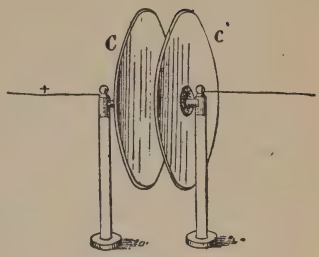

Fig. 13.

Après qu'un condensateur a été chargé, on obtient un courant de décharge des électricités accumulées en réunissant entre elles les deux armatures.

Fig 14.

Quand un condensateur à armatures larges et voisines l'une de l'autre a été chargé avec une machine électrostatique qui est une source dont les pôles peuvent acquérir une très forte différence de potentiel, les effets calorifiques, lumineux, mécaniques, physiologiques du courant de décharge deviennent

importants. On les met souvent en évidence en faisant usage d'une *bouteille de Leyde*, condensateur à lame isolante de verre (fig. 14) qui a la forme d'une bouteille. On dirige, dans diverses substances, la décharge d'une batterie de bouteilles de Leyde avec un *excitateur*, formé de deux tiges métalliques, montées à charnières et supportées par des pieds isolants. A leurs extrémités voisines, ces tiges sont terminées par des boules ; leurs extrémités opposées sont reliées par des chaînes métalliques aux armatures de la batterie.

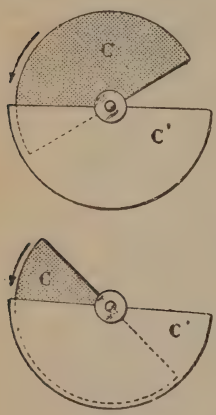

Fig. 15.

On emploie souvent des condensateurs à *capacité variable;* leurs armatures sont formées de lames parallèles C et C', dont les surfaces sont amenées par rotation à se recouvrir plus ou moins, en restant séparées par un intervalle isolant (fig. 15).

INDUCTION

Les courants électriques dont il a été question jusqu'ici étaient des courants *continus*, c'est-à-dire des courants de sens invariable ; mais, avec une même source, pile ou autre, on peut imposer aux courants des directions et des intensités diverses. Si, par exemple, le courant d'une pile P suit, dans un fil conducteur, entre une borne A reliée au pôle positif et une borne B reliée au pôle négatif, un chemin ACB, on lui fera suivre le chemin BCA dans le même fil en joignant la borne B au pôle positif et la borne A au pôle négatif. Ces changements de sens ACB, BCA, peuvent être répétés à des intervalles de temps égaux ou inégaux. Les courants *alternatifs*, ainsi obtenus dans un même fil conducteur, auront une durée qu'on fera varier à volonté ; ils seront reproduits, à intervalles constants ou à intervalles variables. Les signes des pôles de la pile restant les mêmes, on conçoit, que, par l'intervention de résistances convenables et d'un mécanisme inverseur réglé, on obtienne toutes sortes de formes de courants.

Des courants alternatifs très variés sont habituellement produits dans des fils conducteurs, sans artifices mécaniques, et, même sans communication avec des sources électriques, par l'influence d'actions magnétiques qui s'exercent à une distance plus ou moins grande. Ces courants d'influence ou d'*induction* produisent, dans un circuit, des effets intérieurs et extérieurs comme les courants continus, mais leur origine est entièrement différente. Ils ont été découverts

en 1832 par Faraday. C'est dans un espace où s'exerce une force magnétique variable qu'un circuit conducteur peut devenir le siège de courants électriques induits. La démonstration de la production de ces courants se fait commodément avec des circuits formés de fils conducteurs enroulés en solénoïdes. On distingue deux sortes d'induction électrique : l'*induction mutuelle* et la *self-induction*.

INDUCTION MUTUELLE

L'induction est dite mutuelle si elle s'exerce entre deux circuits. Trois exemples vont résumer les phénomènes d'induction mutuelle les plus fréquemment utilisés.

I. Deux solénoïdes, de diamètres inégaux, dont l'un S peut s'engager dans l'autre S', ont été disposés l'un au-dessus de l'autre, leurs axes étant en prolongement. Un courant continu passe d'une façon permanente dans S ; dans le circuit fermé S', où ne passe aucun courant, est intercalé un ampèremètre (fig. 16).

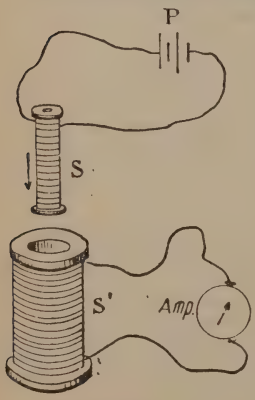

Fig. 16.

Les deux solénoïdes étant immobiles et le courant qui parcourt S restant constant, l'amperemètre de S' n'accuse aucun courant. Mais toute variation, d'intensité ou de position, du cou-

rant, qui passe dans le solénoïde S et qui va se comporter comme courant *inducteur*, provoquera dans le solénoïde voisin, un courant qui sera dit *induit*. Le courant induit est *de même sens* que le courant inducteur quand celui-ci *finit, diminue ou s'éloigne*. Le courant induit est de *sens contraire* au courant inducteur quand celui-ci *commence, grandit ou se rapproche*. Le courant induit a pour durée le temps même de la variation de l'intensité ou de la distance du courant inducteur.

On obtient des effets semblables avec deux simples spires mises en présence, l'une inductrice S, parcourue par le courant continu d'une pile P, l'autre induite S', reliée à un ampéremètre sensible A (fig. 17).

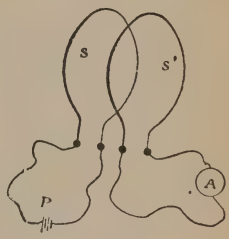

Fig. 17.

On peut préciser le sens d'un courant induit, en disant que le *flux de force auquel le courant induit donne naissance contrarie, à tout instant, la variation du flux magnétique*, qui est dû au système inducteur et qui traverse le circuit induit.

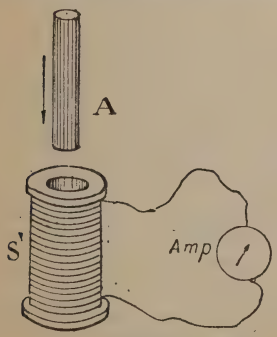

Fig. 18.

II. Au solénoïde inducteur S on substitue un *aimant* A de même axe, pouvant être déplacé suivant cet axe (fig. 18).

Le solénoïde S', qui joue le rôle d'induit, est immobile,

comme précédemment, et n'est parcouru par aucun courant, tant que l'aimant reste fixe ; il est parcouru par un courant induit, si l'aimant se déplace, et le courant induit cesse quand l'aimant s'arrête. L'action magnétique du courant induit contrarie encore ici le déplacement de l'aimant inducteur. Un mouvement de va-et-vient de l'aimant inducteur fait naître dans les spires du solénoïde induit une succession de courants alternativement de sens contraires.

III. A l'aimant inducteur on substitue un *électroaimant* qu'on aimante et qu'on désaimante sans le déplacer. Un noyau de fer doux est recouvert de deux solénoïdes distincts dont les spires sont superposées. On fait passer dans l'un des enroulements un courant continu qui se comporte comme *magnétisant*. L'autre enroulement devient le siège de courants induits qui sont alternativement de sens opposés : de même sens que le courant magnétisant à sa rupture, et de sens contraire à sa fermeture.

Représentation graphique des courants.

La valeur i de l'*intensité* d'un courant, à des temps successifs, peut être représentée graphiquement. On trace une ligne horizontale sur laquelle on porte les temps à partir d'une origine en O et, pour chaque valeur $Oa = t$ du temps, on élève, en a, une ordonnée aA perpendiculaire, égale à l'intensité i du courant à cet instant. Un courant continu et constant est figuré par une *droite horizontale* parallèle à l'axe des temps.

Si l'intensité varie avec des alternatives d'accroissement et de diminution, mais conserve le même sens, la courbe

est *ondulée* sans couper la ligne horizontale des temps.

Si le sens du courant change, les intensités se comptent au-dessus de l'axe des temps pour un sens et au-dessous pour l'autre sens. Le courant est dit *alternatif* si les changements de sens se répètent.

Un courant *alternatif périodique* est un courant alternatif pour lequel les changements de sens se reproduisent régulièrement, après un intervalle de temps constant, appelé *période*.

Les courants alternatifs périodiques dont chaque période comprend deux demi-périodes consécutives qui ne diffèrent que par le sens du courant sont ceux qu'on rencontrera spécialement dans les études qui suivront (fig. 19).

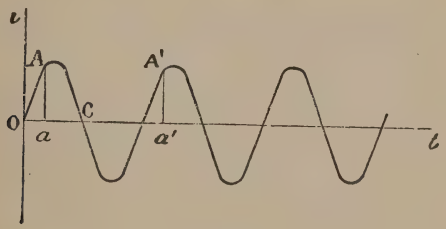

Fig. 19.

L'intensité part de zéro au début d'une période, augmente, atteint un maximum positif, puis décroît jusqu'à redevenir nulle en C ; à ce moment, le courant change de sens, l'intensité augmente jusqu'à un maximum figuré négativement, pour décroître et redevenir nulle à la fin de la période.

Deux valeurs nulles, consécutives, sont distantes d'une demi-période ; deux valeurs égales, A*a* et A'*a*, de même

sens et consécutives, dites alors *dans la même phase* de leur oscillation, sont distantes d'une période. Une demi-période s'appelle aussi une *alternance*. Il y a, par période, deux *alternances* égales en durée et de sens contraires.

Pour chaque demi-période, on appelle *amplitude* la valeur maximum de l'intensité.

Pour un couvent alternatif, comme pour tout phénomène périodique, on désigne sous le nom de *fréquence* le nombre de périodes en une seconde (la fréquence est appelée *hauteur* en Acoustique).

Caractères des courants alternatifs périodiques.

Diverses propriétés permettent de reconnaître un courant alternatif. Si on le fait passer dans un ampèremètre magnétique, l'aiguille de l'appareil recevra, pendant la durée de chaque période, deux impulsions successives, l'une à droite, l'autre à gauche de sa position d'équilibre. Si la masse de l'aiguille est très petite et si la fréquence n'est pas trop grande, l'aiguille exécutera, de part et d'autre de sa position d'équilibre, une série d'oscillations de même période que le courant. Quand la période du courant est notablement plus petite que la durée d'oscillation propre de l'aiguille aimantée mobile, celle-ci aura à peine commencé à se déplacer à droite, par exemple, sous l'action d'une impulsion, qu'elle recevra une impulsion en sens contraire ; alors elle restera sensiblement immobile. On n'obtient aucune déviation à l'ampèremètre, quand deux alternances opposées sont égales et se suivent de *trop près* pour que le système mobile, aiguille ou cadre, ait le temps d'obéir séparément à chacune des impulsions contraires.

On obtient une déviation si les alternances d'un même sens sont toutes arrêtées ou suffisamment affaiblies, ce qui *redresse* complètement ou partiellement le courant alternatif.

L'action calorifique d'un courant étant indépendante de son sens, les diverses parties de son circuit reçoivent des échauffements qui s'ajoutent pour les deux sens d'un courant alternatif. Un *ampèremètre thermique* permet une comparaison des courants alternatifs soit entre eux, soit avec des courants continus.

Si les sinuosités d'un courant alternatif périodique se reproduisent dans l'ordre qui a été indiqué, de demi-période en demi-période, mais avec une décroissance ininterrompue et plus ou moins rapide des ordonnées, les amphitudes sont dites *amorties* (fig. 21). La représentation précédente

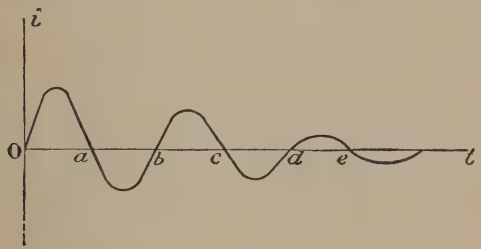

Fig. 20.

s'applique au déplacement oscillatoire d'un point matériel ou d'un corps pesant suspendu, qu'on nomme un *pendule*.

Les extrémités des ordonnées qui représentent les écarts du *centre de gravité* d'un pendule déplacé par un choc décrivent une courbe alternative et périodique. Les

oscillations sont amorties par les frottements au point de suspension et par la résistance de l'air.

SELF-INDUCTION

Un circuit conducteur que parcourt un courant d'intensité *variable* n'est pas seulement inducteur pour des circuits voisins, il l'est encore pour son propre circuit. L'induction qu'exerce une partie d'un circuit sur une autre partie du même circuit s'appelle une *self-induction.*

Dans un circuit qui livre passage à un courant continu, des forces électromotrices de self-induction retardent, à la fermeture du circuit, le courant qui commence. De même des forces électromotrices de self-induction renforcent un courant qui finit.

Quand le courant qui parcourt un circuit, est alternatif, ses variations ininterrompues font naître à tout instant une self-induction qui les contrarie.

L'induction d'une partie d'un circuit, parcouru par un courant sur les autres parties est plus accentuée quand le circuit que parcourt le courant est *enroulé en bobine,* parce que chacune des spires produit dans les spires voisines des forces électromotrices de self-induction qui retardent un courant qui commence et renforcent un courant qui finit. On dit qu'une partie de

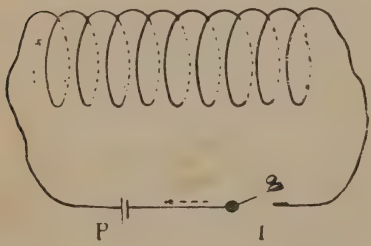

Fig. 21.

circuit qui offre un enroulement possède une *grande self-induction.*

C'est ce qu'on réalise en fermant puis en ouvrant en I, à l'aide d'un manipulateur, le circuit d'une pile P dont le courant parcourt une spirale (fig. 21).

LOI GÉNÉRALE DE L'INDUCTION

La force électromotrice d'un courant induit est *proportionnelle à la grandeur et à la rapidité de la variation du flux de force magnétique inducteur* qui traverse le circuit induit. Lorsque la variation est extrêmement rapide, ce qui est le cas des courants alternatifs de haute fréquence, les courants induits, eux-mêmes alternatifs, ont aussi une haute fréquence.

Condensateur et spirale de self-induction dans un circuit de courant alternatif.

Un condensateur, intercalé sur le trajet d'un courant continu, accumule, sur ses deux faces en regard, des électricités égales et contraires. La circulation du courant de charge s'arrête quand la différence de potentiel des deux armatures est égale et opposée à celle des deux pôles de la source.

Quand un condensateur est placé sur le trajet d'un courant alternatif, le sens de sa charge est continuellement renversé : il se comporte alors, par ses charges et ses décharges successives, comme s'il livrait simplement passage au courant alternatif. La circulation de passage est d'autant plus accentuée que la surface des armatures en regard est plus grande.

Quand une spirale de fil d'un très grand nombre de tours est placée sur le trajet d'un courant alternatif de haute fréquence, les courants induits, eux-mêmes alternatifs et, à chaque instant, de sens contraire aux courants inducteurs, peuvent annuler, à peu près complètement, ces derniers. C'est ainsi qu'une spirale de self-induction constitue un barrage pour un courant de haute fréquence

Les modes spéciaux d'action d'un condensateur et d'une spirale sur un courant alternatif permettent de séparer un courant continu et un courant alternatif de haute fréquence qui parcourent tous les deux, simultanément, un même fil métallique B ; on fait suivre ce fil d'une bifurcation d'où partent : une première branche comprenant un condensateur C, et une seconde branche comprenant une spirale de fil S (fig. 22). Le condensateur livre passage au courant alternatif seul, le courant continu parcourt seul la spirale. Les deux courants peuvent, après la bifurcation, se réunir de nouveau en B′ dans un même fil métallique.

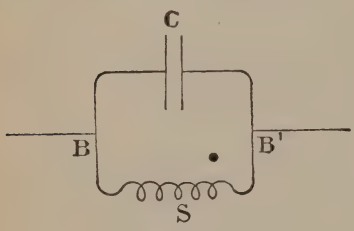

Fig. 22.

APPAREILS USUELS.

Un rappel de quelques appareils d'usage courant dans les deux télégraphies, avec fil de ligne et sans fil de ligne, aura l'avantage de simplifier les descriptions futures. Une vue sommaire du fonctionnement d'une sonnerie électrique, d'un téléphone, d'une bobine d'induction, de la télégraphie avec fil de ligne, de la téléphonie par fil, de la commande d'un effet par fil de ligne, de la télégraphie optique, servira d'introduction, logique et historique, à la radiotélégraphie.

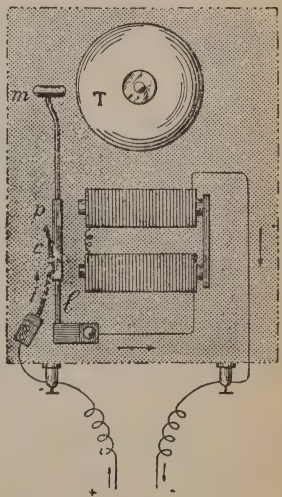

Fig. 23

SONNERIE ÉLECTRIQUE

La sonnerie électrique est une application directe de l'*aimantation intermittente* d'un électroaimant. Le circuit d'une sonnerie comprend une pile, un électroaimant et des fils conducteurs. Au passage du courant de la pile dans la

bobine magnétisante de l'électroaimant de la sonnerie, le noyau qui s'aimante ouvre le circuit magnétisant en attirant une palette *p* de fer doux (fig. 23). Le circuit étant ouvert, l'électroaimant n'agit plus. Ramenée par l'élasticité de la lame *l* qui la porte, la palette de fer doux rétablit en *c* le contact de fermeture du circuit magnétisant. Une réaimantation du noyau renouvelle l'ouverture du circuit. Les aimantations et les désaimantations du noyau se succèdent automatiquement à intervalles égaux. Un choc de la palette contre le noyau accompagne l'aimantation. En général, en même temps, un marteau *m* que porte la palette mobile frappe aussi contre un timbre T.

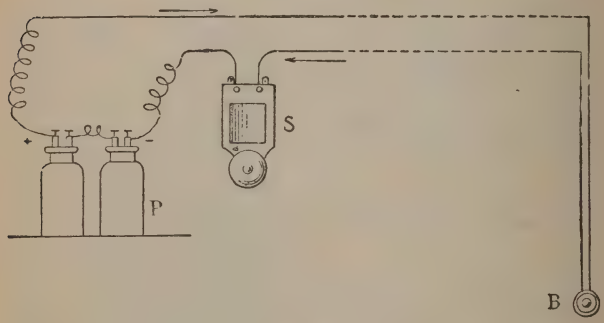

Fig. 24.

Pour l'usage habituel d'une sonnerie dans un appartement, le circuit de la pile et de l'électroaimant interrupteur se prolonge jusqu'à un point B (fig 24) plus ou moins éloigné d'où peuvent partir des appels. Là, les bouts libres d'un fil coupé, dégagés de leur gaîne isolante, peuvent être

serrés par un bouton (fig. 25), l'un contre l'autre ; ils ferment alors le circuit magnétisant de l'électroaimant. Pour un appel ordinaire, la sonnerie se fait entendre tant que dure la pression du doigt contre le bouton.

On conçoit qu'une sonnerie électrique puisse servir à établir une correspondance par des combinaisons de signaux de durées différentes.

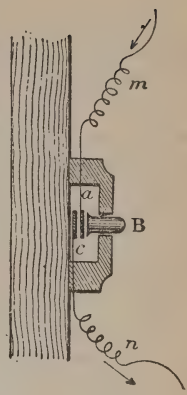

Fig. 25.

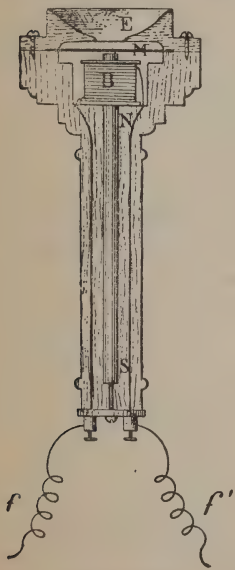

Fig. 26.

TÉLÉPHONE

Un *téléphone* est un appareil électromagnétique qui fait entendre la parole à distance. Il fait partie d'un circuit fermé qui comprend, en même temps, une pile et un microphone. Le microphone se trouve au poste où l'on parle, qui est plus ou moins éloigné du poste d'écoute. Sous sa forme la plus simple, un téléphone consiste en un aimant entouré à l'un de ses pôles N par une bobine B à nom-

breuses spires de fil isolé. En face et tout près de ce pôle, une mince *membrane de tôle* M, fixée par ses bords dans une gaîne, occupe le fond d'un cornet E qu'on peut appliquer à l'oreille. Les extrémités du fil de la bobine se prolongent par deux fils conducteurs *f* et *f'* (fig. 26) qui gagnent parallèlement le poste où l'on parle

Si le circuit de la pile vient à être fermé, un accroissement de l'aimantation de l'aimant détermine une attraction de la membrane du téléphone qui est accompagnée d'un claquement ; la membrane reprend sa position primitive à l'ouverture du circuit. Dans la transmission de la parole, le circuit de la pile restant fermé, la membrane est plus ou moins attirée par le pôle à l'occasion des variations d'intensité que le microphone fait naître dans le courant qui circule autour de l'aimant.

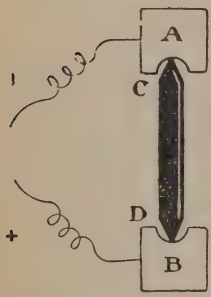

Fig. 27.

Un *microphone* est un assemblage de contacts solides, assez mobiles pour que de faibles trépidations modifient, en même temps que leur contiguité, la résistance qu'ils opposent au passage d'un courant électrique (fig. 27). Cette résistance est modifiée par les secousses que les sons impriment à l'air, quand on parle devant le microphone ; sous l'action des ondes sonores, le courant qui traverse le microphone éprouve alors des variations d'intensité dont la forme correspond aux modulations de la voix. Ces variations, transmises au téléphone par le fil de ligne, font vibrer la membrane du téléphone à l'unisson des vibrations sonores. Le

courant de la ligne redevient constant [1] et le téléphone est silencieux, dès qu'on cesse de parler devant le microphone. Quelle que soit la complexité des opérations de transmission, l'expérience montre que le téléphone reproduit tous les caractères de la parole émise devant le microphone.

Lorsque le fil qui entoure l'aimant du téléphone, au lieu d'être parcouru par un courant *continu*, comme dans l'usage ordinaire, est parcouru par un *courant alternatif* dont la fréquence est constante, plusieurs cas sont à considérer.

Si la fréquence est peu élevée, les alternatives d'attraction et de répulsion font vibrer la membrane du téléphone pendant le passage du courant et l'oreille entend un son dont la hauteur est égale à la fréquence du courant.

En cas de fréquence trop élevée, l'*inertie de la membrane* la maintient immobile dans les alternatives d'attraction et de répulsion, car elle ne peut répondre séparément à une attraction et à une répulsion qui se suivent de trop près. Mais lorsque les oscillations de haute fréquence sont plus ou moins *redressées*, l'effet *résultant* du courant alternatif est celui d'un courant continu et la membrane est attirée d'une façon permanente jusqu'à la fin du passage du courant. Si les oscillations de cette même fréquence très élevée forment des groupes séparés d'oscillations, qu'on appelle des *trains*, avec repos entre deux trains consécutifs, le téléphone reste encore silencieux quand les oscillations alternatives de ces trains ne sont pas redressées, mais si elles sont redressées, un claquement se fait entendre à chaque train, comme pour un courant continu, pourvu que la fréquence des trains soit assez basse. Quand

1. Quand on parle devant le microphone, la ligne horizontale des intensités est remplacée par une *courbe microphonique* ondulée.

cette fréquence des trains est uniforme, la membrane vibre, pour les oscillations redressées, avec la note de la fréquence propre des trains.

Le cas d'un téléphone recevant des trains séparés d'oscillations ne se rapporte plus à une reproduction de la parole à distance, il n'est alors question que de réception de signaux dont le caractère peut varier.

BOBINE D'INDUCTION

Une bobine d'induction [1] est formée d'un noyau de fer doux sur lequel sont enroulés séparément un circuit inducteur et un circuit induit. Le circuit inducteur ou *primaire* est intérieur ; c'est un gros fil de cuivre d'un petit nombre de spires, qui entoure directement le noyau ; on y fait passer le courant d'une pile P qu'un interrupteur ouvre et ferme périodiquement en *i*. L'interrupteur peut être automatique et fonctionner comme dans une sonnerie à palette tremblante. Le circuit induit ou *secondaire*, superposé au circuit primaire, est séparé de lui par un tube isolant en ébonite ; il est formé par un très grand nombre de spires d'un fil très fin, parallèles aux spires inductrices. L'addition des forces électromotrices qui sont induites dans les nombreuses spires du circuit secondaire donne une force électromotrice très élevée.

A la fermeture aussi bien qu'à l'ouverture d'un courant inducteur, une même quantité d'électricité est mise en circulation par induction dans le fil induit ; mais comme, en raison d'effets de self-induction, un courant met un temps notablement plus long à s'établir qu'à finir, la force

1. La figure 39 présente une bobine d'induction servant à produire les étincelles d'un éclateur dans un poste d'émission de télégraphie sans fil.

électromotrice qui est induite à la fermeture du courant inducteur est très inférieure à la force électromotrice induite à l'ouverture. L'expérience a montré que la force électromotrice d'ouverture est encore renforcée quand on introduit en dérivation, en *i*, de part et d'autre de l'interruption automatique, les armatures d'un condensateur, C, de capacité convenable.

Dans ces conditions d'établissement de la bobine d'induction, si les extrémités libres du fil secondaire sont convenablement écartées, il n'y a pas d'étincelle aux fermetures du circuit primaire, mais une étincelle éclate en E à chaque ouverture.

Les étincelles de la bobine d'induction ne livrent alors passage qu'aux courants induits d'ouverture, et, comme ces courants induits du circuit secondaire ont le même sens que le courant continu du circuit primaire, les bornes de l'éclateur ont un signe constant pour les courants qu'elles laissent passer ; elles sont ainsi semblables, pratiquement, aux pôles d'une machine électrostatique. On peut donc parler d'un pôle positif et d'un pôle négatif aux bornes de l'éclateur du circuit secondaire d'une bobine d'induction. Une bobine d'induction a, facilement, un plus grand débit qu'une machine électrostatique et, avec un interrupteur rapide, ses étincelles se succèdent à des intervalles très courts.

TRANSFORMATEURS

Une simple bobine à deux enroulement inégaux, l'un F à gros fil d'un petit nombre de spires, l'autre *f* à fil fin d'un très grand nombre de spires, prend le nom de *transfor-*

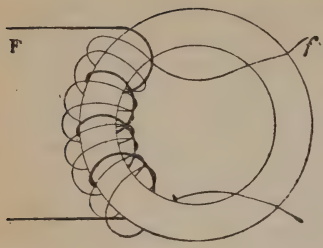

Fig. 2..

mateur quand on dirige un courant alternatif dans l'un de ses fils (fig. 28).

Par ses variations, le courant inducteur alternatif fait naître dans l'autre fil un courant qui est encore alternatif Le courant alternatif induit est maximum quand le courant alternatif inducteur passe par sa valeur nulle, c'est-à-dire par sa vitesse de variation maximum. Le courant alternatif induit est nul quand le courant alternatif inducteur a une vitesse de variation nulle, c'est-à-dire quand il est lui-même maximum.

Si l'on fait passer dans le gros fil F, un courant alternatif de grande intensité et de faible force électromotrice, l'intensité induite dans le fil fin *f* sera réduite par la résistance du fil, mais la somme des forces électromotrices des très nombreuses spires sera fort élevée. Inversement, en dirigeant dans le fil fin un courant alternatif de faible intensité et de grande force électromotrice, on recueille à la sortie du gros fil un courant alternatif de grande intensité et de faible force électromotrice.

On voit que le même circuit peut-être tour à tour inducteur ou induit et que les deux transformations inverses sont réalisables. Dans la bobine d'induction, le gros fil est toujours inducteur et son courant est interrompu régulièrement. Un transformateur n'a ni interrupteur ni pièce mobile. Il peut avoir un noyau de fer ou n'en pas avoir.

Dans l'association des deux spirales des appareils qui viennent d'être décrits, l'énergie du courant que l'on fait circuler dans l'une passe dans l'autre en proportion d'autant plus grande qu'elles sont plus voisines ou, suivant l'expression usitée, que leur couplage inductif est plus *serré*. La perte d'énergie dans la transformation va en croissant à mesure que les enroulements en présence s'écartent l'un de l'autre. On dit alors que leur couplage est *lâche*.

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE AVEC FIL DE LIGNE

Le circuit d'un télégraphe électrique ordinaire pourrait être constitué, comme celui d'une sonnerie électrique d'appartement par une pile, un double fil de ligne, un électroaimant et un bouton d'appel. Le bouton serait au poste d'émission, l'électroaimant se trouverait au poste de réception. La pile doit comprendre, dans un télégraphe à stations éloignées, un nombre notable d'éléments, car l'accroissement de la distance rend considérable la résistance du fil de ligne ; il convient alors d'accroître la force électromotrice pour que l'aimantation de l'électroaimant reste suffisante.

Une simplification importante a pu être introduite en télégraphie. Entre le bouton d'appel et l'électroaimant, il suffit d'*un fil unique*. A chacun des deux postes, une large plaque métallique est plongée dans le sol. En jouant le rôle de conducteur entre les plaques de deux stations, la terre remplace le second fil (fig. 29).

Au bouton de fermeture de la sonnerie on a substitué un levier M. nommé *manipulateur*, que l'on abaisse à la

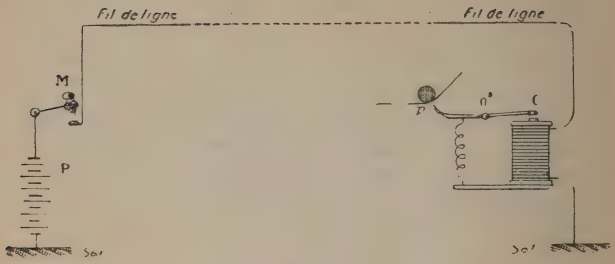

Fig. 29.

main pour mettre en communication deux pièces d'un contact qui ferment momentanément le circuit de la ligne. Il se relève automatiquement par l'effort d'un ressort antagoniste.

L'électroaimant à palette qui sert de récepteur de la télégraphie avec fil de ligne, ne ferme plus et n'ouvre plus automatiquement, comme par une sonnerie, le circuit de la ligne. Le courant ne passe plus par la palette ; entrant par une des extrémités du fil de l'électroaimant et sortant par l'autre extrémité, il n'est ouvert et fermé que par le manipulateur.

Habituellement, le jeu du manipulateur commande *une inscription de la dépêche*. A cet effet, la palette de l'électroaimant porte un crayon dont la pointe *p*, soulevée quand le courant passe dans le fil de l'électroaimant, appuie contre un ruban de papier qui, se déroule par un mouvement d'horlogerie. Pour une fermeture brève du manipulateur le crayon fait un très court tracé, appelé *point ;* un tracé plus long, produit par une fermeture de plus longue durée, est appelé un *trait.*

L'emploi d'un alphabet spécial, appelé *alphabet Morse*, presque universellement adopté, où chaque lettre est conventionnellement représentée par une combinaison de *points* et de *traits* (fig. 30), permet l'expédition textuelle de toutes les dépêches.

Un trait a sensiblement la longueur de trois points. Deux signaux consécutifs d'une lettre sont distants d'un intervalle égal à un point, deux lettres d'un mot sont séparées par un intervalle égal à un trait ; l'intervalle est plus long entre deux mots.

Afin de restreindre les frais d'installation, le fil de ligne n'a qu'une faible section ; il en résulte que, pour de grandes distances, la résistance du circuit augmente considérablement ; alors l'attraction de la palette par l'électroaimant devient insuffisante pour appuyer la pointe du crayon contre le ruban de papier. Dans ce cas, au poste de réception, à l'électroaimant inscripteur ordinaire, dans le circuit du fil de ligne, on substitue un appareil électromagnétique, appelé *relais*, dont l'équipage mobile obéit à un faible courant beaucoup plus aisément que la palette de l'électroaimant. A la fermeture du circuit de la ligne par le manipulateur, le relais ne reçoit qu'un courant très réduit ; il agit en fermant un circuit auxiliaire, disposé au poste de réception et distinct du circuit de la ligne. La fermeture de ce circuit fait intervenir une nouvelle source d'électricité.

Dans ce circuit local du poste de réception, où les fils conducteurs sont courts, se trouve l'électroaimant inscripteur, animé par une pile qui donne un courant beaucoup plus fort que le courant de la ligne [1].

Tant que dure la fermeture de la ligne principale par

1. L'emploi d'un relais conduit à une amplification de l'effet commandé, grâce à la mise en action d'une source locale d'électricité.

SIGNAUX MORSE

Lettres		Chiffres	
a	----- • —	1	---- • — — — —
b	---- — • • •	2	---- • • — — —
c	---- — • — •	3	---- • • • — —
d	---- — • •	4	---- • • • • —
e	---- •	5	---- • • • • •
f	---- • • — •	6	---- — • • • •
g	---- — — •	7	---- — — • • •
h	---- • • • •	8	---- — — — • •
i	---- • •	9	---- — — — — •
j	---- • — — —	0	---- — — — — —
k	---- — • —		
l	---- • — • •		
m	---- — —		
n	---- — •		
o	---- — — —	Signal d'appel	
p	---- • — — •		
q	---- — — • —	• — • — • — • —	
r	---- • — •		
s	---- • • •		
t	---- —		
u	---- • • —	Signal de détresse	
v	---- • • • —	(en télégraphie sans fil)	
w	---- • — —	• • • — — — • • •	
x	---- — • • —		
y	---- — • — —		
z	---- — — • •		

le manipulateur du poste d'émission, le déplacement de l'équipage mobile du relais maintient fermé le circuit local et l'électroaimant inscripteur reste animé. Un point ou un trait est tracé suivant la durée de la fermeture de la ligne par le manipulateur.

Il n'est pas inutile de faire remarquer qu'au poste de réception, le relais pourrait être remplacé par un téléphone qu'un lecteur au son appliquerait à son oreille. Mais le jeu de la membrane du téléphone ne permet pas de distinguer une brève entrée du courant d'une entrée un peu plus longue. Toutefois, une seule fermeture brève du manipulateur produirait un choc au téléphone qui représenterait un point, tandis que trois ou quatre fermetures brèves *très rapprochées* détermineraient une impression correspondant à un trait. Il pourrait être commode de maintenir la manœuvre usuelle du manipulateur d'émisson. Conservant alors le relais au poste récepteur, on introduirait, avec le téléphone, dans le circuit auxiliaire local, un électroaimant à interrupteur automatique rapide qui couperait le courant de 800 à 1.000 fois par seconde. Cette substitution au courant continu du circuit local d'un très grand nombre de tranches de courants successifs très rapprochés ferait distinguer par le téléphone un signal court à un ou deux chocs d'un signal long à 5 ou 6 chocs.

Il est bien entendu qu'une réception de signaux au téléphone ne peut pas porter le nom de téléphonie ; cette dénomination ne s'applique qu'à une transmission de la parole.

TÉLÉPHONIE

Le circuit d'une ligne téléphonique comprend, comme le circuit d'une ligne télégraphique, une *pile*, un *transmet-*

teur et un *récepteur*. Le transmetteur est un *microphone* devant lequel on parle ; il remplace le manipulateur du télégraphe. Le récepteur est un téléphone. L'intensité du courant continu qui circule dans le fil de ligne varie, d'après les modulations de la voix. Il ne convient pas qu'une ligne téléphonique n'ait qu'un fil unique, comme une ligne télégraphique, et que la terre remplace le second fil. Il lui faut deux fils, un pour l'aller et l'autre pour le retour et ces deux fils doivent être assez voisins pour n'entourer qu'une surface très petite. La ligne téléphonique se trouve alors protégée contre des courants d'induction dus à des phénomènes électro-magnétiques extérieurs. Au poste de réception, en appliquant contre son oreille un téléphone dont le fil fait partie du circuit de la ligne, un correspondant, prévenu par une sonnerie, entend et reconnaît la parole de son interlocuteur.

On peut reproduire la parole en faisant usage, pour courant de transmission sur la ligne téléphonique, d'un courant alternatif régulièrement entretenu. On parle devant un microphone disposé à la station d'émission sur le trajet du courant alternatif. Par ses variations de résistance sous l'influence de la voix, le microphone agit sur les amplitudes de chacune des alternances qui parcourent la ligne. Si le courant, qui vient ensuite impressionner le téléphone à la station de réception, a été plus ou moins *redressé*, le téléphone reproduit la parole émise avec tous ses caractères.

TÉLÉMÉCANIQUE PAR FIL CONDUCTEUR

A de très courtes distances, de simples moyens mécaniques assurent la commande de divers mécanismes. Ces moyens deviennent trop grossiers quand la distance aug-

mente. Des fluides sous pression ont été alors utilisés avantageusement dans certains cas, mais c'est à l'électricité qu'on a le plus souvent recours.

Un courant continu permet d'effectuer, à distance, au moyen d'un manipulateur qui est installé à un poste de commande, la réalisation d'effets variés. Le poste de commande et le poste d'exécution, qui peuvent être très éloignés l'un de l'autre ou séparés par des obstacles momentanément infranchissables, sont reliés par un simple fil de ligne plongé en terre à ses deux extrémités. Le circuit comprend un manipulateur, une pile et un électroaimant. L'agencement des appareils à faire fonctionner a pu être réglé à l'avance dans tous les détails, de manière qu'aucun opérateur n'ait besoin d'intervenir, au poste d'exécution, pendant la réalisation des effets commandés.

La palette d'un électroaimant ou la pièce mobile d'un relais, fermera au poste d'exécution, par bascule ou par rotation, au gré du manipulateur du poste de commande, un circuit spécial localisé au poste d'exécution. Le courant de ce dernier circuit, une fois déclanché, se maintiendra s'il est entretenu sur place par une source convenable d'énergie qui fait partie du poste d'exécution ; les effets commandés par le courant faible d'une simple pile, agissant par le fil de ligne sur le relais seront rendus localement aussi puissants et aussi prolongés qu'on le voudra. En émettant des courants successifs qui varient par leur durée respective et par leurs intervalles, le poste de commande déclanche tel ou tel organe récepteur. Par une préparation bien étudiée, les effets produits seront suspendus, repris, modifiés à des instants dont on restera maître.

Il a été commode dans certains cas d'utiliser des courants alternatifs de périodes différentes suivant simultanément un

même fil de ligne et s'adressant à des récepteurs qui correspondent à leurs périodes respectives.

TÉLÉGRAPHIE OPTIQUE

La télégraphie aérienne de Chappe était une télégraphie optique. Dans certains cas, les puissantes sources lumineuses des phares ont été utilisées pour l'expédition de dépêches proprement dites. Au langage de Chappe où les signaux représentaient de courtes phrases, l'alphabet Morse a été substitué par la manœuvre d'un écran devant le feu lumineux. Un éclair isolé figurait un point, trois ou quatre éclairs très rapprochés équivalaient à un trait. La transmission peut s'opérer en tous sens ou être limitée à une seule direction, pour une plus grande portée, au moyen d'un miroir parabolique ou d'une lentille. La dépêche est reçue par l'œil d'un observateur, ; elle peut aussi être enregistrée par un appareil installé au poste de réception.

L'usage de radiations particulièrement choisies ou de rayons polarisés a pu, au besoin, rendre les messages invisibles à ceux qui n'étaient pas armés d'un récepteur approprié. La télégraphie optique a pu avantageusement être employée entre deux stations convenablement choisies, distantes de 200 kilomètres.

A la fin du XIXe siècle, les services de la guerre avaient établi, dans le sud de l'Algérie, sur des points culminants, des postes optiques qui se succédaient à des distances de 40 à 120 kilomètres. Les projecteurs lumineux étaient installés dans des fortins entourés d'une solide enceinte.

Différentes conditions atmosphériques qui sont fré-

quentes dans certaines régions et, en tout cas, un obstacle interposé entre la source et le récepteur suspendent toute communication. D'ailleurs, même en mer, la courbure de la terre apporte vite une limite de distance infranchissable.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

La télégraphie avec fil de ligne est une télégraphie par *conduction* où un courant électrique, habituellement continu, circule de l'une à l'autre des deux stations en correspondance. Le courant actif ne s'écarte pas d'un fil conducteur qui réunit les deux stations.

Théoriquement, on conçoit une télégraphie par *induction*, dans laquelle un courant inducteur, circulant dans un circuit installé à un poste d'émission, agirait, à distance, sur un circuit induit distinct, localisé à un poste de réception, sans qu'il y ait de liaison matérielle entre les deux circuits. Un courant électrique serait brusquement produit, puis brusquement suspendu dans le circuit inducteur d'émission. Des courants induits correspondants prendraient naissance au poste de réception, où ils agiraient momentanément sur un indicateur de courant. Plusieurs postes récepteurs pourraient être influencés simultanément par un poste unique d'émission.

Les systèmes de circuits qui se sont, dès le début de l'étude des phénomènes d'induction, le plus efficacement prêtés aux effets de courant ont été des solénoïdes avec ou sans noyaux de fer. Un solénoïde inducteur, à courants interrompus, peut agir sur un solénoïde induit de même axe. Une fermeture ou une ouverture d'un courant inducteur, effectuée à l'aide d'un manipulateur, peut ainsi

donner naissance à un courant induit, correspondant, de courte durée.

Mais, que le courant inducteur fût alternatif ou continu, il fallait, pour qu'il y eût une action appréciable, que la distance du système inducteur et du système induit demeurât très faible ; aussi, pour cette raison, une production d'effets électriques commandés, *à distance, sans fil*, ne fut à aucun moment envisagée.

Les courants alternatifs inducteurs, d'abord employés, avaient été des courants alternatifs de basse fréquence. Or, d'après la loi fondamentale de l'induction, une force électromotrice induite est proportionnelle à la *vitesse de variation* du flux magnétique inducteur enveloppé par le circuit induit. La suite des recherches montrera l'importance pratique de cette loi.

L'Américain Henry et l'Italien Matteucci avaient observé que des décharges de bouteilles de Leyde, accompagnées d'étincelles, donnaient lieu à des courants d'induction plus vifs que ceux qu'on observait d'ordinaire ; il est naturel d'attribuer cette puissance d'induction à la courte durée des décharges de ces condensateurs.

Sous sa forme primitive, la télégraphie sans fil de ligne a été une télégraphie par induction où les courants inducteurs étaient des courants de décharges de condensateur accompagnées d'étincelles. L'histoire des débuts de la télégraphie sans fil de ligne est donc liée à l'étude des étincelles électriques de décharges de condensateurs.

NATURE D'UNE ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE

Les éclatements lumineux de la foudre ont une origine semblable à celle des étincelles de décharges de condensateurs, mais leur soudaineté et les dangers qui accompagnent leur apparition ne permettaient guère leur examen. Ce n est que depuis *le XVIII*e *siècle*, époque à laquelle des décharges de bouteilles de Leyde furent d'abord obtenues, puis souvent répétées, pour reconnaître leurs effets, que l'étincelle électrique fut attentivement observée. Pendant longtemps cependant, on ne sut d'elle que ce que nos sens nous montrent directement, qu'elle est sonore, lumineuse et chaude. Sa durée avait aussi été trouvée extrêmement courte.

EXPÉRIENCES DE FEDDERSEN

Vers 1860, Feddersen, en faisant réfléchir sur un miroir tournant M, une étincelle E de décharge de condensateur, donna, pour la première fois, une démonstration expérimentale précise et incontestable du caractère oscillatoire du courant électrique de décharge d'un condensateur. L'étincelle était verticale et éclatait dans l'air (fig. 31). L'axe de rotation OO' du miroir tournant était vertical comme le miroir M. L'image de l'étincelle, reçue sur un écran P, était également verticale, et elle était étalée horizontalement, perpendiculairement au trait lumineux. Reçue sur une

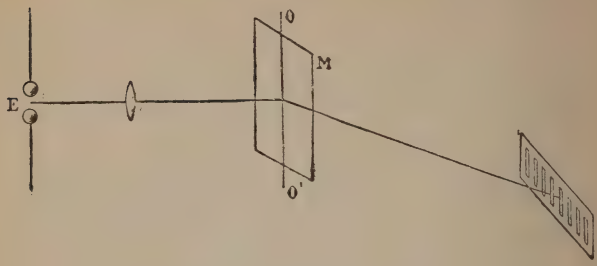

Fig. 31.

plaque photographique et développée, cette image, au lieu de former une traînée lumineuse continue, offrait sur sa longueur un petit nombre de bandes lumineuses équidistantes, séparées par des bandes obscures. Il y avait donc plusieurs décharges, donnant lieu à des étincelles distinctes ; la persistance des impressions sur notre œil les faisait voir à la fois, quand on n'avait pas recours au miroir tournant. La photographie indiquait, d'après l'aspect des bandes, qu'elles partaient tour à tour, de l'une puis de l'autre, des boules de l'éclateur. Les courants changeaient donc alternativement de sens et, comme les bandes lumineuses, ils diminuaient rapidement d'intensité.

Connaissant la vitesse de rotation du miroir, la longueur occupée sur la photographie par l'ensemble de l'image d'une étincelle permet de calculer la durée totale de la décharge ; cette durée n'est qu'une petite fraction de seconde. Comme le courant de l'étincelle change alternativement de sens, en passant par une valeur nulle à des intervalles de temps égaux, il a le caractère des courants alternatifs pério-

diques. La photographie pouvait aussi permettre de mesurer la durée de la période.

Feddersen avait constaté expérimentalement que cette période augmente avec la capacité et avec la self-induction du circuit de décharge. Le *circuit de décharge* est l'ensemble que forment les deux armatures du condensateur, les fils qui vont aux deux boules de l'éclateur et l'intervalle gazeux que parcourt l'étincelle.

La décharge cesse d'être oscillante si la résistance de son circuit devient considérable. Par réflexion sur le miroir tournant, l'image de l'étincelle prend alors la forme d'une traînée lumineuse unique, allongée dans le sens de la rotation du miroir. Le courant de décharge va, dans ce cas, en augmentant jusqu'à un maximum, puis il diminue progressivement jusqu'à devenir nul.

Quand le circuit de décharge est peu résistant, ce qui arrive, pendant l'étincelle, quand il est formé de gros conducteurs métalliques, celle des deux armatures, qui était primitivement positive, devient négative après une première décharge, puis elle redevient positive après la seconde et ainsi de suite. Les oscillations sont dues à des effets de self-induction dans le circuit. Les variations du flux magnétique, que le circuit enveloppe pendant la décharge, sont extrêmement rapides et les forces électromotrices d'induction qui prennent naissance peuvent atteindre des milliers de volts.

EXPÉRIENCES DE HERTZ

En 1887, Hertz, en diminuant considérablement la capacité et la self-induction du circuit de décharge d'un condensa-

teur, obtint des fréquences notablement plus élevées que celles de Feddersen. Son appareil avait l'aspect de l'excitateur qu'on employait d'ordinaire pour montrer les divers effets des bouteilles de Leyde. Il se composait de deux tiges de laiton, de longueur égale, en prolongement l'une de l'autre et séparées par un faible intervalle d'air AB (fig. 32). De part et d'autre de cet inter-

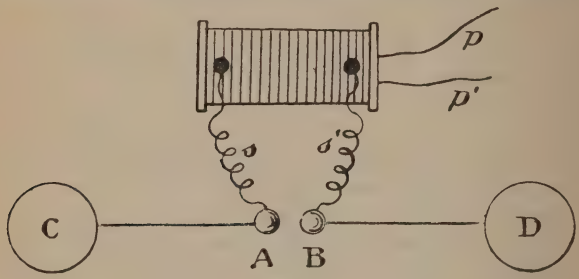

Fig. 32.

valle, chaque tige était limitée par une petite boule. Les extrémités opposées des deux tiges étaient terminées chacune par une grosse boule, en C et D. Chargées d'électricités contraires, les deux branches de l'excitateur peuvent être comparées aux armatures d'un condensateur dont les capacités principales sont les deux grosses boules, la couche isolante étant l'intervalle d'air AB.

On relie les deux branches aux extrémités s et s' du fil secondaire d'une bobine d'induction. Au moment où le circuit du fil primaire p de la bobine a été *ouvert* par son interrupteur automatique, les deux conducteurs AC et BD prennent une différence de potentiel qui est celle des extrémités du fil secondaire et qui augmente jusqu'au moment où une

étincelle éclate entre A et B. En raison de l'échauffement de l'intervalle d'air et de l'entraînement des particules métalliques arrachées aux boules de l'éclateur, la résistance de l'étincelle est très faible. La décharge est indépendante du fil secondaire, dont la self-induction oppose une résistance absolue à toute dérivation d'un courant de haute fréquence. La grande résistance de l'intervalle d'air AB se rétablit après l'étincelle.

A chaque ouverture du circuit primaire de la bobine d'induction, l'éclateur de l'excitateur donne une étincelle de décharge.

On savait qu'un courant alternatif de décharge produit des effets d'induction dans les conducteurs voisins.

Hertz fit voir que la propagation de ces effets a lieu par un *rayonnement vibratoire électrique*, qui est comparable à un rayonnement vibratoire lumineux et dont la fréquence est celle du courant alternatif de la décharge elle-même.

Hertz eût difficilement mesuré cette haute fréquence par la méthode du miroir tournant, car elle était supérieure à dix millions et la décomposition d'une décharge ne peut convenablement s'obtenir pour une fréquence de un million qu'avec une rotation du miroir d'environ 500 tours par seconde. Il calculait cette fréquence N, d'après une expression théorique de la période d'oscillation T en fonction des trois constantes du circuit de décharge, qui sont la résistance R, la capacité C et la self-induction L. Dans les expériences de Hertz, où R était négligeable, la période de l'oscillation s'exprimait par

$$T = 2\pi\sqrt{CL}.$$

En cas de rayonnement et d'une propagation uniforme de ce rayonnement, il est légitime, en admettant que le

milieu de transmission prend lui-même part aux alternances de la source rayonnante, d'appliquer les équations qui conviennent à la propagation de la lumière ou du son :

$$NT = 1, \ V = N\lambda,$$

où N est la fréquence, T la période, V la vitesse de propagation, λ la longueur d'ondulation, c'est-à-dire l'espace parcouru par le mouvement vibratoire dans son milieu de propagation, pendant la durée T d'une vibration. Le célèbre physicien anglais Maxwell avait admis que la vitesse de propagation de vibrations électriques dans l'air ou dans le vide devait être la même que pour la lumière, c'est-à-dire 3.10^{10} centimètres par seconde. Ayant calculé T d'après les valeurs expérimentales de C et de L qui se rapportaient à son excitateur, Hertz introduisait N, qui est l'inverse de T, dans l'équation $3.10^{10} = N\lambda$ et obtenait la longueur d'ondulation λ pour le mouvement vibratoire électrique de fréquence N.

La valeur de λ, ainsi obtenue par Hertz, était de l'ordre de grandeur d'une longueur d'ondulation sonore ; elle se prêtait donc à la reproduction, dans un laboratoire, d'une expérience d'interférence électrique, semblable à celle que Savart avait faite autrefois pour étudier l'*interférence d'une onde sonore directe et d'une onde sonore réfléchie* contre un mur. Quand le mouvement vibratoire sonore réfléchi, de retour à la source, était en concordance avec le mouvement vibratoire direct, l'intervalle de la source au mur était subdivisé en parties égales par des *nœuds* et des *ventres* fixes de vibration, la surface réfléchissante étant un nœud et la source un ventre. La distance d'un nœud à un ventre consécutif est alors le quart de la longueur d'ondulation des vibrations de la source.

Faite dans les mêmes conditions par Hertz pour une vibration électrique issue de son excitateur, en prenant comme surface réfléchissante une surface plane métallique M, cette expérience fit connaître directement la longueur d'ondulation λ, par la simple mesure d'une distance entre un nœud et un ventre, c'est-à-dire d'un minimum stationnaire de mouvement vibratoire à un maximum stationnaire consécutif. La longueur d'ondulation λ, relative à la fréquence N qui était connue, était ainsi trouvée expérimentalement, indépendamment de la connaissance de la vitesse V. Il a été alors possible de calculer V d'après l'équation $V = N\lambda$, sans faire intervenir l'hypothèse de Maxwell. La valeur de V, ainsi calculée, confirmée ensuite par une détermination directe, très précise, due à Blondlot, est égale à la vitesse de propagation de la lumière.

D'après les expériences de Hertz, on pouvait donc affirmer que, dans un milieu qui est identique en toute direction, un rayonnement électrique, issu d'un point, se propage avec la vitesse d'un rayonnement lumineux. A un instant donné, il offre des *mouvements vibratoires* qui sont concordants sur une sphère ayant pour centre le point. Cette sphère est une surface d'onde. Des sphères, ayant le même centre, sont aussi des surfaces d'onde. Deux surfaces d'onde, issues d'une même source, sur lesquelles les mouvements vibratoires sont au même instant concordants, ou comme on dit, dans une même phase de leur vibration, sont distantes d'un nombre entier de longueurs d'ondulation.

L'égalité des deux vitesses de propagation du rayonnement lumineux et du rayonnement électrique conduisait à admettre un même milieu de propagation pour les deux genres de vibration. Le milieu qui transmet les vibrations

électriques sera donc le milieu cosmique supposé à la fois élastique et résistant, mais impondérable, auquel on attribue la propriété de transmettre la lumière en vibrant lui-même, et qu'on appelle *éther*.

Il est dès lors naturel de considérer les vibrations électriques et les vibrations lumineuses comme des *vibrations de l'éther*, ne différant que par la période. Une confirmation de cette hypothèse, apportée par Hertz et ses continuateurs, est la communauté de propriétés des deux sortes de vibrations. En se propageant dans différents milieux, elles éprouvent des modifications semblables, conformément à des lois qui s'énoncent de la même manière, par *réflexion*, *réfraction*, *diffraction* et *polarisation*.

Les corps sur lesquels les *vibrations électriques* se réfléchissent sont les corps *bons conducteurs* et, en particulier, les métaux. Pour les vibrations électriques, il y a aussi des corps *transparents* et des corps *opaques* ; les corps transparents sont les corps isolants ou diélectriques tels que l'air, le verre, l'ébonite, l'essence de térébenthine.

Les longueurs d'onde sont beaucoup plus grandes pour les rayons électriques que pour les rayons lumineux ; or, les dimensions des miroirs et des lentilles devraient être alors tellement grandes, que pour répéter avec les rayons électriques les expériences usuelles, de réflexion et de réfraction de la lumière, leur construction serait irréalisable. Il en est ainsi déjà pour les longueurs d'onde de quelques-unes des expériences de Hertz.

En ce qui concerne la diffraction, la grande longueur d'onde des rayons électriques leur permet, comme aux rayons sonores, de contourner aisément les obstacles.

Comme les vibrations lumineuses, les vibrations élec-

triques se superposent, en se propageant, sans déformation.

CLASSEMENT DES VIBRATIONS DE L'ÉTHER

Si l'on classe les diverses vibrations de l'éther par *ordre de fréquence*, en partant des plus rapides pour arriver aux plus lentes, on voit les propriétés des groupes successifs varier progressivement. Les vibrations de l'éther, que l'on rencontre dans les diverses branches de la physique, forment trois groupes dont les radiations s'échelonnent sur environ 50 octaves, la fréquence doublant d'une octave à la suivante. En partant de la fréquence la plus grande, le premier groupe est celui des rayons X ; le second est celui auquel appartiennent les rayons lumineux ; il s'étend depuis les rayons ultra-violets les plus réfrangibles jusqu'aux rayons calorifiques les moins réfrangibles ; le troisième groupe est celui des rayons électriques.

Le *premier groupe* comprend des rayons dits *pénétrants*, qui traversent dans une certaine mesure les corps opaques ; leur pouvoir de pénétration diminue en même temps que leur fréquence. En tête, avec la fréquence la plus grande ou la longueur d'onde la plus courte, se placent les rayons γ du radium, puis les rayons X *durs* et enfin les rayons X *mous*, moins pénétrants que les rayons durs. Dans les rayons de la plus haute fréquence de ce groupe, la longueur d'onde est au moins dix mille fois plus petite que la longueur d'onde $0^{\mu},1$ d'une radiation ultra-violette située à la limite de la partie visible du spectre lumineux.

Au *second groupe* appartient la région lumineuse du spectre solaire, qui s'étend seulement de la longueur d'onde

$0^{\mu},4$ à la longueur d'onde $0^{\mu},3$ [1]. Aux deux extrémités de la région lumineuse, se trouvent, du côté le plus réfrangible, les radiations ultra-violettes et, de l'autre côté, les radiations infra-rouges. On peut prendre, pour point de départ du groupe, la longueur d'onde $0^{\mu},1$ d'une radiation ultra-violette ; on passe par $0^{\mu},6$ pour une radiation voisine du vert et on va jusqu'à $0^{mm},3$ pour la radiation calorifique la plus réfrangible qu'on ait observée. A $0^{\mu},1$ correspond la fréquence trois millions de milliards, d'après l'équation $3.10^{10} = N\lambda$; pour $0^{mm},3$ la fréquence tombe à mille milliards.

Le *troisième groupe* est celui des *radiations électriques*. La radiation électrique la plus courte qui ait été reconnue expérimentalement avait une longueur d'onde égale à environ 3 millimètres. Dans l'intervalle compris entre $0^{mm},3$ et 3 millimètres, il y a une lacune composée de radiations non encore jusqu'ici rencontrées. Pour 3 millimètres, la fréquence est cent milliards. Une des étincelles de l'excitateur de Hertz, convenable pour répéter l'expérience de l'interférence d'une vibration électrique directe et d'une vibration électrique réfléchie contre un mur, avait une longueur d'onde de 3 mètres, et une fréquence de cent millions. Une des étincelles des expériences de Feddersen, dans la décomposition en courants alternatifs d'une décharge de condensateur, avait une longueur d'onde de 300 mètres correspondant à une fréquence de un million. La longueur d'onde de 300 mètres sera la longueur d'onde d'un petit poste de télégraphie sans fil. Une longueur d'onde de 30 kilomètres, utilisable dans un très grand poste, conduit à la fréquence dix mille.

1. Le *micron* μ représente un millième de millimètre, $0^{mm},3$ valent 300 μ.

ORIGINE DE LA RADIOTÉLÉGRAPHIE

Les expériences de Hertz ont eu un grand retentissement ; elles confirmaient l'existence d'un rayonnement électrique, prévu par Maxwell et semblable au rayonnement lumineux. Il se propage comme lui par ondes, empruntant pour sa propagation le même éther cosmique. Ces expériences n'apportaient, elles-mêmes, rien qui parût susceptible de faire jouer à ce rayonnement un rôle dans une propagation à distance. Les radiations électriques qui auraient semblé, à ce point de vue, particulièrement efficaces, auraient été celles qui développent les plus grandes forces électromotrices d'induction. Or, ce sont celles dont la période est la plus courte et qu'on appelle plus spécialement radiations hertziennes. D'après l'expression de leur période,

$$T = 2\pi \sqrt{CL},$$

elles proviennent de sources de très petite capacité, et l'énergie qu'elles portent est très faible. A quelles distances aurait pu agir la lumière si ses sources n'avaient eu qu'une intensité aussi réduite ?

Les expériences de Hertz n'étaient pas de nature à suggérer des applications lointaines du rayonnement électrique, aucun récepteur connu ou soupçonné, n'eût été assez sensible ; il faut donc chercher ailleurs l'origine des essais d'une télégraphie électrique sans fil dont l'idée ne venait à personne.

L'étincelle des décharges électriques ordinaires, qui avait,

à la fin du XVIIIe siècle, suscité les expériences de Dalibard et de Franklin, qui avait conduit Feddersen, puis Hertz à des résultats d'une importance exceptionnelle, allait encore, sous sa forme ordinaire, jouer un rôle précurseur.

RADIOCONDUCTEURS

La première télégraphie électrique sans fil fut une télégraphie par étincelles. Elle eut pour origine des recherches qui furent présentées à l'Académie des Sciences en 1890

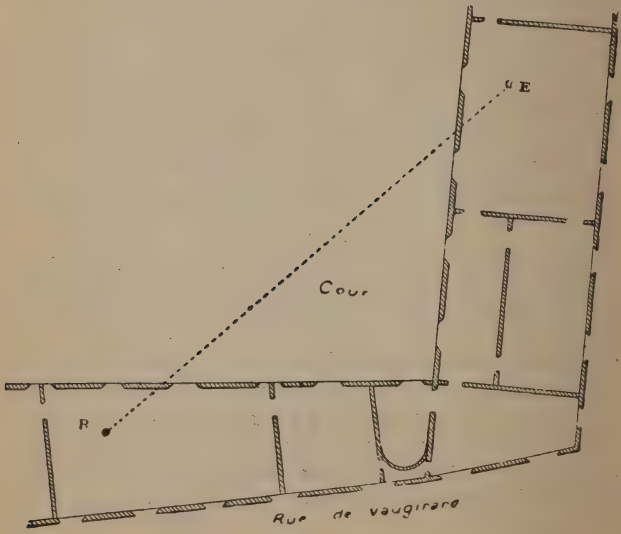

Fig. 33.

et 1891, et qui signalaient la *termeture, à distance, d'un circuit* de pile sous l'influence rayonnante d'une étincelle de décharge de condensateur.

Dès sa première communication, l'auteur, M. Branly, décrit explicitement une expérience qui offre à la fois un fait nouveau de conductibilité électrique et son utilisation pratique.

Dans une salle de cours, (fig. 33) se trouve, en E, un éclateur à étincelles dont les boules sont les pôles d'une machine électrostatique de Wimshurst munie de son condensateur (fig. 12). Dans une salle éloignée de la salle de cours et séparée d'elle par trois pièces, est installé, en R, un petit circuit local (fig. 34) formé par un *élément Daniell* à sul-

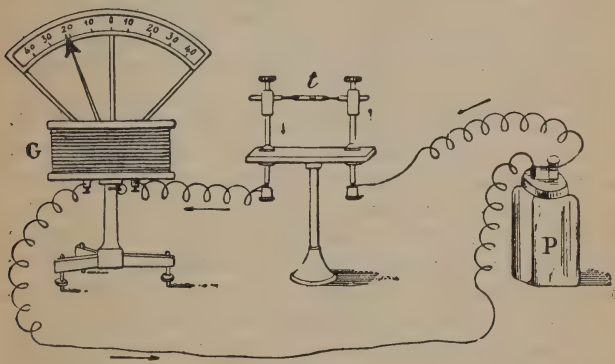

Fig. 34.

fates P, un *galvanomètre* G et un *tube à limaille t*, qui est un tube de verre étroit contenant un peu de limaille métallique intercalée entre deux tiges conductrices *aa'* et *bb'*

FIG. 35.

(fig. 35). La ligne droite ER, qui va de l'éclateur au circuit de pile, a une longueur d'au moins 25 mètres, elle traverse deux murs que sépare une cour. On peut dire que l'éclateur se trouve à un poste d'émission et le tube à limaille à un poste de réception. Il n'y a aucune liaison matérielle entre les deux postes. Le circuit étant fermé, aucun courant n'y circule et l'aiguille mobile du galvanomètre reste au zéro de la graduation. Si, à un moment donné, une étincelle éclate à l'éclateur, la limaille devient instantanément conductrice et le galvanomètre accuse une déviation qui persiste quelque temps. Un très léger choc sur le tube à limaille ou sur son support supprime le courant, une nouvelle étincelle entre les pôles de l'éclateur le rétablit. Ces alternances se succèdent à volonté.

L'auteur changea successivement la nature de la limaille, la grosseur de ses grains, la substance isolante qui sépare les grains, le métal des pistons conducteurs, leur pression. Il opéra aussi avec un *contact unique* de deux substances conductrices choisies, dont il fit varier encore les conditions. La modification de la résistance fut, avec presque toutes les substances en contact, une diminution.

Souvent les étincelles de l'éclateur de la machine de Wimshurst furent remplacées par celles d'un éclateur alimenté par le fil secondaire d'une petite bobine d'induction. Les appareils sensibles, à conductibilité alternative, qui étaient employés et qui se comportaient comme le tube à limaille du début, renfermaient constamment un ou plusieurs contacts imparfaits de forte résistance initiale. Leur conducti-

bilité se produisait encore, sous l'influence d'une étincelle électrique, à distance, lorsque le circuit dont ils faisaient partie était largement interrompu. En le fermant après l'éclatement de l'étincelle active, on constatait la conductibilité.

Les contacts les plus sensibles étaient ceux qui offraient déjà, avant l'action de l'étincelle, une conductibilité presque imperceptible. Cette très faible conductibilité initiale était atteinte par une pression lentement graduée sur les conducteurs qui limitaient le contact imparfait, ou par un accroissement de la force électromotrice de la pile.

Le contact imparfait qu'une étincelle électrique rendait conducteur à distance pouvait être appelé un *radioconducteur*, puisque l'effet paraissait se produire sous l'influence d'un rayonnement. Intercalé dans un circuit de pile, le radioconducteur maintient d'abord le circuit ouvert à la façon d'un isolant, mais il livre ensuite passage au courant quand une étincelle de décharge de condensateur éclate à sa portée.

Alors que des corps conducteurs laissent passer d'emblée un courant électrique, que les corps isolants arrêtent le courant, les radioconducteurs peuvent devenir successivement, à volonté, conducteurs et isolants : leur conductibilité peut donc être *intermittente*.

Dans ces expériences, *la lumière* de l'étincelle *n'intervient pas*, car le circuit récepteur, installé dans une salle éloignée, est séparé de l'étincelle par des murs ; il peut d'ailleurs être installé isolément dans une cave. La conductilité du radioconducteur se produisait, sous l'influence d'une étincelle éloignée, quand on l'enfermait avec son circuit entier dans une cage en verre bien close ou dans une caisse en bois. Dans ce dernier cas, une sonnerie, que le courant mettait brusquement en activité, était souvent substituée à un galvanomètre dont les parois de la cage masquaient les déviations,

Tout changeait si le radioconducteur était, avec son circuit, complètement enveloppé par une *cage métallique*. Si petite que fut, cette fois, la distance des deux postes et si puissante que devint l'étincelle extérieure, le radioconducteur se montrait constamment insensible. Les parois de la cage pouvaient être de minces feuilles d'étain ou des toiles métalliques à mailles serrées.

Deux faits importants furent ensuite observés. *Dans une première série d'expériences*, un circuit étant enfermé tout entier dans une cage métallique, alors qu'une forte étincelle extérieure ne produisait aucun effet à l'intérieur, même quand elle éclatait au voisinage immédiat de la cage, une étincelle qui pouvait être assez éloignée, se montrait *active* s'il sortait par une petite ouverture de la cage *une longueur de quelques centimètres d'un fil conducteur* relié métalliquement au circuit intérieur à contact sensible. Ce fil conducteur était isolé de la cage comme le circuit lui-même. On employait souvent une cage en toile métallique que la lumière traversait suffisamment pour qu'on pût voir, par réflexion sur un miroir, les déviations de l'aiguille du galvanomètre du circuit intérieur.

Dans une autre série d'expériences, on voyait une tige conductrice, reliée à une des branches de l'éclateur, augmenter notablement la portée d'une étincelle d'émission. Grâce à l'emploi de pareilles tiges, suffisamment longues, une étincelle de condensateur fort éloignée, réduite à une petite fraction de millimètre, restait active.

Les deux séries précédentes d'expériences ont conduit, respectivement, à l'emploi des tiges conductrices annexées régulièrement plus tard, sous le nom d'*antennes*, à chacun des deux postes de la télégraphie sans fil.

Au point de vue du mécanisme de la conductibilité

provoquée dans un radioconducteur on constatait qu'un radioconducteur sensible à l'action d'une étincelle à distance, devient encore conducteur quand on le soumet simplement, dans un circuit, à l'action de la force électromotrice d'un nombre suffisant d'éléments de pile associés en série.

Lorsque la conductibilité développée par l'influence d'une étincelle était assez éloignée de la valeur maximum que pouvait atteindre le contact sensible, la moindre trépidation la supprimait. Il fallait un choc accentué si la conductibilité était voisine de son maximum.

Un réglage du choc, facile à obtenir avec des étincelles qui variaient peu, permettait de réaliser des alternatives ininterrompues de conductibilité et de résistance, par succession d'étincelles et de chocs.

Dès le début, l'auteur des recherches précédentes faisait remarquer que la conductibilité provoquée dans un contact imparfait par l'étincelle était due à la haute valeur de la force électromotrice des courants induits que la brusque décharge d'un condensateur faisait naître à distance dans le circuit du radioconducteur.

En définitive, si l'étude des radioconducteurs faisait connaître un nouveau genre de conductibilité, elle présentait, en outre, une application de cette conductibilité en réalisant à distance la fermeture instantanée d'un circuit de courant électrique, sans liaison matérielle entre le poste de commande et le poste de travail. Une télégraphie sans fil a trouvé là ses éléments essentiels [1].

1. Au premier jour du succès de ses mémorables expériences de 1899, entre les côtes de France et d'Angleterre, M. Marconi adressa à M. Branly la dépêche suivante qui fut transmise par télégraphie sans fil de Douvres à Wimereux :

M. Marconi envoie à M. Branly ses respectueux compliments à travers la Manche, ce beau resultat étant dû, en partie, aux remarquables travaux de M. Branly.

Les expériences de radioconductibilité qui ont été décrites ne font intervenir aucune idée théorique. Ce sont des faits observés. Il n'y est question ni d'oscillations électriques ni d'ondes électriques. On voit figurer, d'une part, une étincelle de décharge de condensateur éclatant en un poste A. D'autre part, un circuit qui renferme un élément de pile a été constitué en un autre poste B ; ce circuit comprend un *contact imparfait* choisi et un indicateur de courant tel qu'un ampèremètre. Il n'y a aucune liaison entre les postes A et B. Quand une étincelle de décharge de condensateur vient à éclater au poste A, la circulation immédiate d'un courant, que le contact imparfait suspendait, fait tout à coup dévier l'ampèremètre du poste B ; cette circulation peut d'ailleurs donner lieu, en B, à une *action quelconque* du courant électrique. L'effet a lieu à travers les murs.

La commande ainsi effectuée, par une sorte de rayonnement électrique, est *expérimentalement* indépendante de toute connaissance antérieure sur la nature de l'étincelle électrique. Pour les applications, cette connaissance n'était pas indispensable. La nature de la lumière et son mode de propagation n'ont été fixés qu'au début du XIXe siècle, cependant la lumière a été utilisée de tout temps. Il est vrai que, pour la lumière, notre organisme possédait un œil. Le circuit d'une pile qui renferme un radioconducteur est un *œil électrique* ; cet œil indépendant a un avantage, on ne le forme qu'en cas de besoin.

Il n'est pas inutile de faire remarquer que, avec un dispositif rigoureusement semblable à celui avec lequel elle a été observée et appliquée en 1890, la conductibilité intermittente d'un radioconducteur aurait pu être découverte il y a un siècle, après qu'Œrsted eut reconnu la déviation

d'une aiguille aimantée par un courant électrique. Effectuant alors la fermeture d'un circuit contenant un contact imparfait, à l'aide d'une étincelle électrique éclatant à distance, on aurait eu un rayonnement électrique utilisable. Une simple déviation de l'aiguille aimantée est un signal que la télégraphie à fil de ligne a, elle-même, primitivement employé. Une télégraphie sans fil aurait, ainsi, pu précéder la télégraphie à fil de ligne.

GÉNÉRALITÉS SUR LES CONTACTS IMPARFAITS

Lorsque, dans un circuit électrique qui renferme un élément de pile, tel qu'un élément Daniell, on intercale une grande résistance R, *qui ne varie pas* avec la force électromotrice E de la source, l'intensité I du courant est exprimée par la relation $I = \frac{E}{R}$, en supposant que la résistance du reste du circuit est négligeable par rapport à R. Avec *n* éléments de pile en série de même force électromotrice E, constituant un circuit qui renferme une résistance R, devant laquelle la résistance de la pile est négligeable, l'intensité devient $I' = \frac{nE}{R}$.

On a vu précédemment que la résistance d'un radioconducteur offrait des *caractères différents* de ceux d'une résistance invariable R. Considérable pour une très faible force électromotrice, la résistance d'un radioconducteur diminue notablement quand la force électromotrice augmente et peut devenir bientôt très faible ; l'intensité du

courant croît alors beaucoup plus vite que proportionnellement à la force électromotrice de la source.

Il en était ainsi pour les premiers radioconducteurs à contacts multiples, sous la forme de tubes à limaille de fer, de nickel, d'or et d'autres métaux, et, de même, pour des contacts uniques, tels que pointes d'acier poli sur disque d'acier poli, pointes de tellure sur disque ou cylindre d'argent, etc..,

Ces premiers radioconducteurs restaient le plus souvent, longtemps conducteurs après l'action d'une étincelle électrique, mais un choc les ramenait à leur résistance initiale. Le réglage du choc s'établissait facilement pour des étincelles successives, maintenues égales, et on obtenait des alternatives de conductibilité et de résistance qui permettaient, soit l'inscription de dépêches, soit la production d'effets variés préparés à l'avance.

En raison de leur sensibilité, de la simplicité de leur construction et de la souplesse de leur réglage, les tubes à limaille furent employés comme révélateurs d'ondes électriques, pendant les premières années de la télégraphie sans fil. Leur genre de conductibilité ne convenait pas, soit pour la réception de signaux *par téléphone* en télégraphie sans fil, soit pour la téléphonie sans fil. On a trouvé des radioconducteurs spéciaux dont la modification de résistance par les oscillations électriques ne persiste pas après que ces oscillations ont cessé d'agir, et on a choisi ensuite dans ce groupe, ceux qui ne laissent pas passer également les deux sens d'un courant électrique. Ces derniers contacts sont les *détecteurs redresseurs*. L'intensité du courant qui parcourt un de ces différents contacts imparfait croît aussi plus vite que la force électromotrice qui lui est appliquée.

Intercalé dans le circuit d'un courant alternatif, un

redresseur, dit *parfait*, arrête complètement l'une des alternances ; le courant qui passe produit alors l'effet d'un courant continu, soit sur un téléphone soit sur un galvanomètre ordinaire.

Il a été indiqué, à propos du téléphone, qu un courant alternatif de haute fréquence n'agit pas directement sur un téléphone. Redressé (fig. 36), il produit l'effet d'un courant continu, c'est-à-dire détermine un déplacement de la membrane. L'effet d'une tranche étroite de courant alternatif, redressée, est celui d'un courant continu de courte durée. Un bref courant alternatif à oscillations décroissantes ou amorties agit encore comme un bref courant continu s'il est redressé et il donne un choc. Une suite de tranches équidistantes alternatives amorties ou non amorties, redressées, donne au téléphone une suite de chocs équidistants.

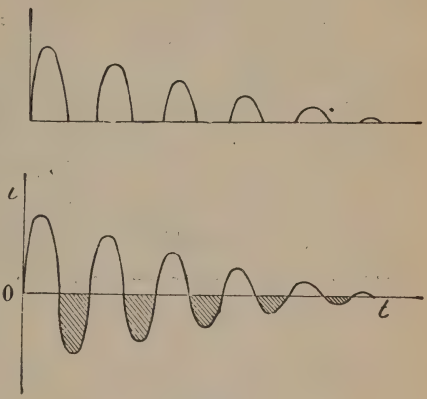

Fig. 36.

Quand les deux alternances d'un courant alternatif sont inégalement diminuées par le passage à travers un contact redresseur, le redresseur est dit *imparfait*. L'une des alternances ne disparaît pas complètement, mais l'effet résultant sur un téléphone ou sur un galvanomètre ordi-

naire est le même, à l'intensité près, qu'avec un redresseur parfait.

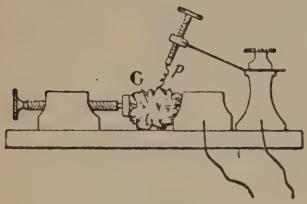

Fig. 37.

Pyrite de fer et pointe de cuivre, carborandum et pointe de carbone, sulfure de plomb et pointe de cuivre et beaucoup d'autres contacts redresseurs ont été avantageusement employés. On fait surtout usage actuellement d'un *fragment de galène* G (sulfure de plomb cristallisé) sur le quel appuie une pointe métallique *p* de cuivre ou de *platine* (fig. 37).

PREMIERS ESSAIS DE RADIOTÉLÉGRAPHIE.

En 1895, un jeune élève du professeur Righi, à Bologne, M. Marconi, répéta, en augmentant graduellement la distance des deux postes, les expériences de radioconductibilité qui avaient été présentées à l'Académie des Sciences en 1890 et 1891 et publiées dans diverses revues.

Après de multiples essais effectués en Italie, sur terre, puis sur mer, avec des tubes à limailles métalliques, M. Marconi vint en Angleterre, où il reçut aide et encouragement.

A cause de la dissémination du rayonnement de l'étincelle, l'effet produit sur le tube et sur son circuit diminuait quand la distance augmentait entre les deux postes, mais les propriétés de l'appareil récepteur se maintenaient si l'on faisait croître, d'abord séparément, puis à la fois l'énergie de l'étincelle de l'éclateur et la hauteur de tiges conductrices annexées aux deux postes.

M. Marconi mit en relief le rôle essentiel des tiges libres qu'il reliait, simultanément, l'une à une boule de l'éclateur au poste d'émission, l'autre à une des faces du contact imparfait au poste de réception, et qu'il appelait des *antennes*.

L'organisation des deux postes, à laquelle il s'arrêta après de longues recherches et qui fut d'abord adoptée sans changement par tous ceux que son succès entraîna sur ses traces, est désignée sous le nom d'*excitation directe*.

EXCITATION DIRECTE

Poste d'émission.

Le *poste d'émission* (fig. 38) comprend trois parties :

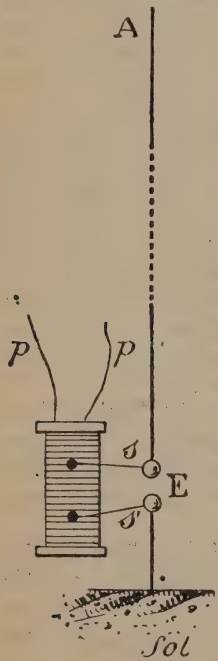

Fig. 38.

1° L'organe essentiel qui est l'excitateur, c'est-à-dire l'éclateur à étincelles oscillantes de décharge électrique. L'éclateur E consiste en deux boules métalliques séparées par un petit intervalle d'air.

2° La boule supérieure de l'éclateur se prolonge en haut par une longue tige métallique A, nue, appelée *antenne*, qui se dresse verticalement vers le ciel. L'antenne est portée par un mât d'une grande hauteur.

3° La seconde boule de l'éclateur est en communication avec le sol par un *très court* prolongement conducteur qui est vertical comme l'antenne. La communication avec le sol se fait par une ou plusieurs plaques métalliques, reliées entre elles et enterrées dans un sol humide, afin de constituer une bonne prise de terre.

L'antenne et la terre forment les deux armatures d'un condensateur qu'on charge et qu'on décharge tour

à tour. Ces armatures sont chargées par le fil secondaire d'une bobine d'induction ; les deux extrémités libres *s* et *s'* de ce fil arrivent respectivement aux deux boules de l'éclateur.

Le fil primaire *p* de la bobine est parcouru par un courant continu emprunté à une batterie d'accumulateurs. Un interrupteur automatique coupe, de 50 à 100 fois par seconde, le circuit du courant des accumulateurs.

La ligne des centres des deux boules est verticale.

A chaque interruption du circuit primaire de la bobine d'induction, jaillit, à l'éclateur, une étincelle de décharge de condensateur. Cette étincelle doit être blanche, rectiligne et claquante.

Le circuit primaire de la bobine comprend un manipulateur M, semblable au manipulateur de la télégraphie ordinaire à fil de ligne. Ce manipulateur permet de fermer à la main, pendant un temps variable à volonté, le circuit que l'interrupteur automatique de la bobine d'induction ouvre d'autre part périodiquement, en *i*, à intervalles très rapprochés (fig, 39).

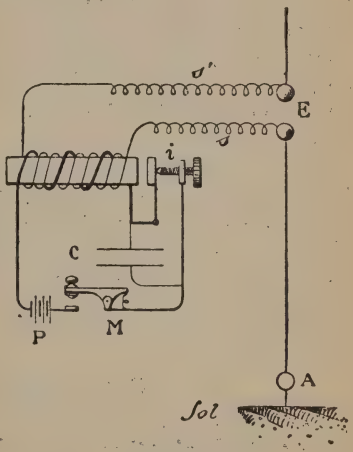

Fig. 39.

Quand l'expéditeur maintient abaissé le manipulateur, le fonctionnement de l'interrupteur automatique produit plusieurs ouvertures

du circuit primaire, et, à chaque ouverture, une étincelle jaillit entre les boules de l'éclateur.

Chaque étincelle est accompagnée de courants alternatifs de haute fréquence qui parcourent le circuit de décharge et l'antenne d'émission. Par la partie libre de l'antenne, ils donnent lieu à un rayonnement qui se disperse dans l'espace.

Il est essentiel que, dans sa partie libre qui part de la boule supérieure de l'éclateur, l'antenne soit parfaitement isolée afin que des déperditions par les supports ne diminuent pas l'énergie rayonnée.

L'expéditeur opère, pour l'envoi d'une dépêche, comme en télégraphie ordinaire : l'apprentissage est le même. S'il appuie sur le manipulateur pendant un temps très court, un signal bref correspond à une ou deux étincelles de l'éclateur. Avec une fermeture plus longue du manipulateur, le nombre des étincelles de l'éclateur s'élève à 4 ou 5, ce qui convient pour un signal long. Signaux courts ou *points* et signaux longs ou *traits* se succèdent suivant l'alphabet Morse du télégraphe à fil de ligne (fig. 30).

L'antenne étant verticale, le rayonnement issu du poste d'émission se dissémine à grande distance sans qu'il y ait de direction particulièrement favorisée. Il n'y en a qu'une très minime fraction qui atteigne le poste de réception.

Poste de réception.

Le *poste de réception* comprend trois parties comme le poste d'émission. On avait au poste d'émission une antenne radiatrice verticale, un éclateur sur le trajet de cette antenne et un court prolongement vertical avec prise de terre.

On voit au poste de réception (fig. 40) : 1° Une longue tige A', ou *antenne collectrice*, verticale, de même longueur que l'antenne radiatrice ; 2e sur le trajet de l'antenne collectrice, un tube à limaille ou un autre contact imparfait D qui est l'organe de la réception ; 3e une prise de terre.

En dérivation sur l'éclateur se branchait le fil secondaire de la bobine d'induction. En dérivation sur le radioconducteur, il y a un petit circuit qui comprend un élément de pile de faible force électromotrice, souvent voisine de 1 volt, puis un indicateur T de courant.

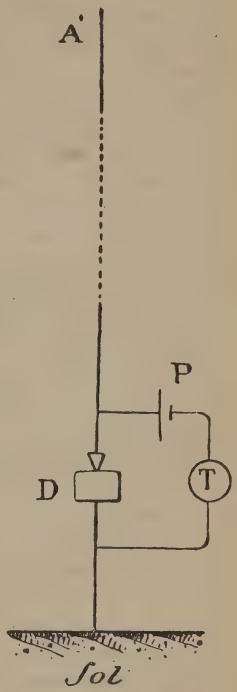

Fig. 40.

Les courants alternatifs de haute fréquence qui circulent dans l'antenne d'émission, à l'occasion d'une étincelle de l'éclateur, font naître, par induction, des courants alternatifs dans tous les conducteurs de l'espace, quels qu'ils soient et, en particulier, dans l'antenne de réception. Avant l'éclatement d'une étincelle du poste d'émission, la résistance du contact imparfait de l'antenne de réception était très forte, pratiquement infinie. Quand une étincelle éclate, les courants qui sont induits dans l'antenne de réception affaiblissent assez la résistance du radioconducteur pour

que, dans son circuit de dérivation, le courant continu de l'élément de pile se trouve fermé et agisse sur l'indicateur de courant.

Dans un poste qui doit être, à volonté, suivant l'heure, un poste d'émission ou un poste de réception, *une seule antenne suffit*. On la rattache indifféremment, soit au circuit d'émission, soit au circuit de réception.

Avant de procéder à l'émission d'une dépêche, on a séparé de l'antenne le contact imparfait de la réception et on l'a enfermé dans une boîte métallique hermétiquement close. Il est ainsi protégé contre l'action des puissantes étincelles, qui vont éclater librement dans son voisinage pendant la durée de l'émission.

Si l'on compare un circuit de télégraphie ordinaire à l'ensemble des deux postes en correspondance, en télégraphie sans fil, on peut dire que, dans ce dernier, le fil de ligne de la télégraphie ordinaire est réduit à *deux tronçons extrêmes*, l'un au départ, l'autre à l'arrivée, qui constituent les antennes. Entre ces antennes, une induction alternative de haute fréquence se propage d'une station à l'autre. A chacune des deux stations de la télégraphie sans fil, une prise de terre remplace un fil de retour, comme en télégraphie ordinaire.

En apparence, le circuit de la commande avec fil, qui occupait les deux postes réunis par le fil de ligne, se trouve, en télégraphie sans fil, transporté, en entier, au poste d'arrivée. On y voit pile, récepteur, fil de jonction ; le manipulateur lui-même ne manque pas. Son rôle est en effet rempli par le minime intervalle qui sépare les deux faces du contact imparfait. La conductibilité de cet espace imperceptible est provoquée par une étincelle de décharge qu'on fait éclater au poste de commande. Tout se passe

comme si, à l'occasion de l'étincelle, une main invisible appuyait l'une contre l'autre les deux faces du contact imparfait et fermait ainsi le circuit.

En révélant au poste de réception la production d'une étincelle d'émission, le circuit local de réception se comporte comme un *œil électrique*, dont le contact imparfait est la partie impressionnée.

Inscription.

Pendant les premières années de l'organisation de la télégraphie sans fil, le courant de pile qu'une étincelle électrique fermait brusquement à distance, au poste de réception, était appliqué à produire deux effets : 1° *Inscription* d'un signal ; 2e *Frappe* sur le radioconducteur, pour lui rendre sa résistance et le mettre en état d'être impressionné de nouveau par une autre étincelle. Ces deux effets ont lieu par l'intermédiaire d'un électroaimant inscripteur. Comme ils exigent un courant supérieur au courant très faible que peut supporter un radioconducteur délicat, l'indicateur de courant, dans le circuit qui renferme la pile et le radioconducteur, est remplacé par un relais sensible qui ferme un circuit de travail.

Quand une étincelle brève éclate au poste d'émission, la fermeture du circuit du contact imparfait est réalisée par la conductibilité brusque du radioconducteur et le relais produit immédiatement la fermeture du circuit de travail. Dans ce dernier circuit, l'électroaimant de l'inscripteur Morse est alors traversé par le courant d'une pile suffisamment forte et il attire vivement sa palette de contact : celle-ci tourne autour de son milieu, une de ses extrémités se soulève et inscrit le signal ; l'autre extrémité

s'abaisse, puis, après avoir ouvert le circuit du radioconducteur, elle frappe contre un butoir qui limite sa course. Le butoir est solidaire du support du radioconducteur, celui-ci perd alors sa conductibilité par la transmission du choc. La suppression de la conductibilité du radioconducteur a été effectuée pendant l'ouverture de son circuit.

Pour l'inscription des dépêches, aussi bien que pour la réalisation d'effets variés par commande à distance sans fil de ligne, les contacts imparfaits dont la conductibilité se prolongeait après l'action de la force électromotrice d'induction étaient d'un emploi avantageux.

Le grand développement des communications radiotélégraphiques a provoqué des simplifications dans la réception. L'inscription des dépêches a été généralement abandonnée et la réception des signaux se fait au son avec un téléphone [1].

Réception au son par téléphone.

La réception par téléphone est à la fois simple et sensible.

Les contacts imparfaits à conductibilité prolongée ont dû être remplacés par des contacts dont la conductibilité cesse immédiatement avec la cause efficiente et qui ont, en outre, la propriété de laisser passer plus aisément un des deux sens du courant électrique.

Au poste de réception, le contact redresseur, qui consiste, par exemple, en un cristal de galène et un fil de platine,

1. La réception au téléphone n a été introduite qu'après plusieurs années en télégraphie sans fil, mais en raison de l'universalité actuelle de son emploi, il ne sera ici question, dans la suite, que de ce mode spécial de réception.

est substitué à l'ancien radioconducteur. Un petit circuit qui renferme un téléphone est disposé en dérivation sur le contact redresseur. Le téléphone T a pris la place qu'occupait le relais dans le cas de l'inscription et tout circuit de travail a disparu.

A chaque étincelle du poste d'émission, un courant alternatif induit de très courte durée parcourt l'antenne de réception : ce courant, redressé, donne un choc au téléphone. Les courants d'un train d'oscillations qui passent dans un sens traversent le détecteur, ceux que le détecteur arrête donnent un choc au téléphone. Une fermeture brève au poste d'émission fait entendre un ou deux chocs qui constituent un point ; une fermeture plus longue donnera cinq ou six chocs constituant l'impression d'un trait.

Dans les divers modes de télégraphie par étincelles ou par ondes amorties, le dispositif de réception au téléphone restera le même que dans l'excitation directe. Il conviendra encore en téléphonie sans fil.

*

Lorsque en 1899, après quatre années de travaux ininterrompus, M. Marconi fut parvenu à organiser des communications régulières entre deux postes à excitation directe, distants d'environ 50 kilomètres, entre Douvres d'une part et Wimereux près de Boulogne, d'autre part, puis à constater que la brume, la pluie, la neige ne contrarient pas les transmissions et enfin à voir traversés ou contournés la plupart des obstacles qui arrêtent la lumière, des installa-

tions d'études surgirent de tous côtés. Les essais persévérants de M. Marconi avaient ouvert une voie qui était jugée à la fois intéressante et profitable.

Alors, parallèlement aux postes que M. Marconi ne cessa pas de perfectionner et de multiplier en divers pays, beaucoup d'autres furent établis et contribuèrent à hâter les progrès.

Pour obtenir les premiers résultats, il avait suffi, après qu'un dispositif avantageux pour l'excitation directe eut été adopté, de continuer les expériences du début en augmentant graduellement l'énergie des décharges et la hauteur des antennes à mesure que les deux postes étaient écartés davantage. Mais, dorénavant, de nouveaux progrès allaient exiger de grands efforts. Il fallait établir un accord entre les postes en correspondance, pour éviter la confusion et augmenter la portée. On ne se trouve plus ici dans les conditions simples de la télégraphie électrique ordinaire où, quel que soit l'éloignement, il ne faut qu'un fil, un courant et un révélateur de courant et où la dépêche, à moins d'une intervention étrangère, ne s'écarte pas de la route qui lui est imposée par le mode même de communication.

CONDITIONS D'ACCORD DE DEUX POSTES

Les problèmes à résoudre étaient complexes et il y a un siècle, ils auraient peut-être paru difficilement abordables, mais les connaissances que l'on possédait en 1899 sur l'étincelle et sur les circuits à éclateur, devaient abréger la durée des tâtonnements.

D'abord, on n'avait pas à déduire de la seule observation des phénomènes la nature de l'agent qui déterminait la conductibilité d'un contact imparfait en présence d'une étincelle électrique. On savait, en effet, qu'un courant de décharge fait naître, à distance, un courant spécial, dit induit, dans le circuit du contact et, c'est à ce courant induit que l'on attribuait tout naturellement l'effet observé.

D'autre part, Feddersen avait montré que le courant de décharge d'un condensateur, par étincelle, est un courant alternatif périodique de haute fréquence. On pouvait alors lui appliquer la loi fondamentale de l'induction, c'est-à-dire la proportionnalité de la force électromotrice induite à la vitesse de variation du flux inducteur enveloppé par le circuit.

Il résultait enfin des recherches de Hertz que les oscillations électriques d'un courant de décharge se dispersent dans l'espace, avec une vitesse constante en conservant leur période. Ces oscillations, conformément à leur caractère périodique, étaient susceptibles de présenter les phénomènes connus d'interférences. L'analogie des phénomènes d'interférences observés par Hertz avec les phénomènes acousti-

ques correspondants pouvait encore servir de guide d'une façon efficace. L'explication du rôle des antennes va en donner un exemple.

ROLE DES ANTENNES

C'est par une interférence proprement dite, semblable à celle que présente un tuyau fermé en Acoustique, que l'on peut se rendre compte du pouvoir rayonnant électrique d'une longue tige cylindrique, verticale, A. dont une extrémité est libre, tandis que sa base est l'une des boules d'un éclateur E. La base de la tige, qui aboutit à la boule supérieure de l'éclateur, reçoit de chaque étincelle un mouvement oscillatoire, ou vibration électrique, dont la période est déterminée et constante. Sa valeur dépend de la constitution du circuit de décharge.

Ce mouvement oscillatoire se propage de proche en proche le long de la tige. Arrêté à l'extrémité libre, il se réfléchit à la façon d'un mouvement sonore qui part de l'embouchure d'un tuyau fermé et rebrousse chemin quand il arrive au fond. L'éclateur se comporte pour l'antenne comme l'embouchure pour le tuyau. On sait qu'on peut, à tout instant, composer en chaque point du tuyau deux mouvements vibratoires du milieu en vibration ; l'un des mouvements est direct, venant de l'embouchure, l'autre, réfléchi sur le fond, est inverse. Le mouvement résultant est toujours nul au fond du tuyau, qui est un *nœud*. Le mouvement résultant est au contraire maximum à l'embouchure celle-ci est un *ventre*. L'extrémité libre d'une antenne, comme le fond d'un tuyau fermé, est un nœud où le mouvement oscillatoire direct, venu de

l'éclateur, et le mouvement inverse réfléchi s'annulent. Il y a un ventre à l'éclateur.

Le potentiel électrique jouant ici le rôle de la pression de l'air dans un tuyau sonore, un nœud de mouvement est un ventre de pression. On voit, en effet, pour de fortes décharges à l'éclateur, des déperditions lumineuses, dues à de hauts potentiels, se produire à l'extrémité libre de l'antenne, où un ventre de pression correspond au nœud de mouvement.

Comme dans un tuyau sonore, la distance d'un nœud à un ventre consécutif est égale au quart de la longueur d'ondulation du mouvement vibratoire.

On sait que, pour le son le plus grave que peut rendre un tuyau fermé, il n'y a qu'un nœud, qui est le fond et un ventre, qui est l'embouchure. La longueur du tuyau est alors le *quart de la longueur d'ondulation* du son qui est rendu et le tuyau est dit vibrer en quart d'onde.

L'expérience a montré qu'une antenne libre vibre aussi en quart d'onde. Il faut entendre par là que, si, à la vibration naturelle ou *fondamentale*, s'ajoutent des vibrations dont la fréquence est 3, 5, 7 fois plus élevée (la loi des harmoniques des tuyaux fermés étant appliquée aux antennes), l'amplitude de ces vibrations surajoutées est relativement très faible.

Ainsi, pour une antenne de 75 mètres, la longueur d'ondulation de la vibration émise sera 300 mètres, ou 30.000 centimètres. D'après l'équation $3{,}10^{10} = N.\ 30.000$, la fréquence N, qui correspond aux 75 mètres de hauteur d'une antenne verticale est 10^6 ou un million.

En poursuivant l'analogie d'une antenne et d'un tuyau fermé rendant sa note la plus grave, on doit admettre, ce qui a été démontré pour un tuyau vibrant

en quart d'onde, que « les effets oscillatoires qui émanent des différentes tranches de l'antenne, perpendiculaires à sa longueur, sont *concordants*, étant de même sens

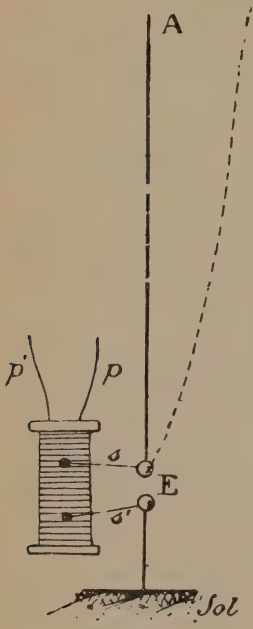

Fig. 41.

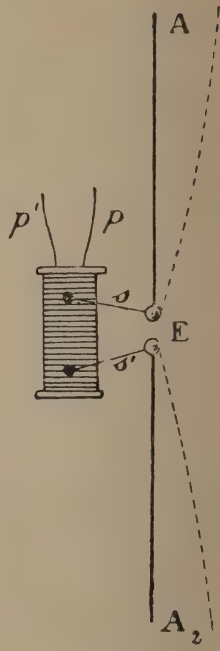

Fig. 42.

et dans la même phase de leur vibration ». Ils s'ajoutent donc en tout point éloigné et cette addition implique un *grand pouvoir rayonnant* (fig. 41).

Si, au lieu de relier au sol, par un court prolongement métallique, la seconde boule de l'éclateur, on lui adjoint une seconde tige se dirigeant en sens inverse de celle qui se dresse vers le ciel, et ayant la même longueur, la comparaison acoustique donne encore d'utiles indications.

Dans ces nouvelles conditions, où l'éclateur se trouve intercalé entre deux tiges égales, l'éclateur et ses deux antennes peuvent être assimilés à un *tuyau fermé aux deux bouts* : il y a, en son milieu, une embouchure qui est un ventre de mouvement. Les deux extrémités libres sont des nœuds de mouvement et des ventres de pression ou de tension. (fig. 42).

La longueur d'ondulation est la même pour chacune des deux tiges, qui vibrent séparément en quart d'onde ; l'ensemble vibre en demi-onde. A un même instant, les amplitudes dans toutes les sections transversales sont concordantes et de même sens.

ROLE DES CADRES

A l'opposé d'une antenne, dont le circuit est dit *ouvert*, un *cadre fermé* n'a qu'un pouvoir rayonnant réduit. En effet, dans un circuit fermé, tel qu'un rectangle, il y a, au même instant, des mouvements qui ont lieu dans un sens en certaines parties du circuit et des mouvements en sens contraire en d'autres. De là, pour un point éloigné, des superpositions de mouvements opposés, qui se contrarient.

Les mêmes considérations s'appliquent, pour la réception, soit à un circuit ouvert d'antenne, soit à un circuit fermé de cadre. En définitive, une *antenne* est, également, un *bon radiateur* et un *bon récepteur*, tandis qu'un cadre

fermé convient également peu pour l'émission et pour la réception, au moins dans les circonstances qui se rapportent aux dispositifs précédents.

CIRCUITS OSCILLANTS ET RÉSONANCE

La nature périodique des oscillations électriques qui se propagent dans le circuit de décharge d'un condensateur a favorisé les premiers progrès de la télégraphie par étincelles. L'entrée en rés nance d'un circuit en oscillation électrique sous l'influence d'un autre circuit parcouru par des oscillations de même période a été aussi mise heureusement à contribution.

La résonance est une propriété générale, commune à différents *systèmes physiques, dits oscillants,* dont l'étude peut servir de guide.

Systèmes oscillants.

Un système oscillant a une position d'équilibre stable. En lui donnant une impulsion, on lui communique une énergie de mouvement. Écarté de sa position d'équilibre, il la dépasse jusqu'à ce qu'il ait acquis une énergie potentielle égale au travail dépensé pour le déplacer. A cette conversion d'énergie de mouvement en énergie potentielle succède, dans le retour vers la position d'équilibre, une conversion inverse d'énergie potentielle en énergie de mouvement. Les mêmes conversions alternatives se succèdent. Les propriétés des systèmes oscillants, bien étudiées par les physiciens pour différents systèmes soumis à des forces variées, tels que *pendules et corps sonores,* s'appliquent aux circuits oscillants électriques.

Pour tout système qui peut osciller librement, la période de ses oscillations libres, ou sa *période propre* a une valeur qui dépend de *grandeurs constantes* spéciales à sa constitution. Pour un système oscillant électrique, ces constantes sont sa *résistance* électrique R, sa *capacité* électrique C, sa *self-induction* L. Chaque portion du circuit a une capacité, mais si un condensateur proprement dit entre dans la composition du circuit, la capacité totale est approximativement la capacité du condensateur. S'il y a une spirale dans le circuit, la self-induction totale du circuit est encore sensiblement égale à la self-induction de la spirale.

Résonance.

On a reconnu qu'en général, si deux systèmes oscillants de même nature et indépendants sont en présence, l'un en oscillation entretenue, l'autre en repos, le système qui était en repos reçoit de l'autre, lorsque le milieu qui les sépare peut entrer lui-même en vibration, des impulsions qui lui communiquent un mouvement oscillatoire croissant. Le système qui était primitivement en repos finit par osciller avec la période agissante, alors même que sa période propre est différente, si l'action du premier système persiste assez longtemps. Une oscillation qui est imposée dans ces conditions est qualifiée *forcée* ; son amplitude est faible si les deux périodes sont très différentes. Dans le cas où, par leur constitution, les deux systèmes ont *la même période propre*, alors qu'ils oscillent *librement*, l'oscillation du système influencé va en augmentant progressivement d'amplitude. Par une succession d'impulsions, le système excitateur transmet graduellement une fraction de son énergie au système influencé. Les résistances qui contrarient le mouve-

ment oscillatoire transmis allant en croissant à mesure que son amplitude augmente, il arrive un moment où elles absorbent toute l'énergie communiquée par le système excitateur. A ce moment, l'amplitude des oscillations du système influencé cesse de croître et un régime permanent s'établit, *en résonance.*

Constatée directement avec deux pendules pesants de même période, la résonance est très aisément observée en Acoustique, avec deux instruments accordés soit de même espèce tels que deux diapasons, soit d'espèces différentes, tels qu'un diapason et un tuyau sonore ou un diapason et une corde vibrante.

Le phénomène de la résonance entre deux systèmes oscillants électriques est mis à son tour en évidence par une expérience aisée à reproduire.

On forme deux circuits ayant chacun self-induction et capacité, mais de faible résistance, auxquels s'applique la formule de la période $T = 2\pi \sqrt{CL}$, quand ils deviennent le siège de vibrations électriques. Ils seront susceptibles d'être accordés en faisant varier dans l'un d'eux la capacité ou la self-induction.

On fait jouer le rôle d'excitateur à l'un des deux circuits ; pour cela, on le munit d'un éclateur E et on charge sa capacité ou son condensateur C par les pôles du fil secondaire *ss'* d'une bobine d'induction (fig. 43). La présence du condensateur augmente l'énergie des étincelles provoquées entre les boules de l'éclateur. Le second circuit fermé, appelé à jouer par induction le rôle de circuit récepteur, n'a pas d'éclateur ; il comprend un ampèremètre thermique A. Quelle que soit, au début, la composition relative des deux circuits, à une succession rapide d'étincelles dans le premier correspond bientôt

dans le second, qui est placé à proximité, une déviation fixe de l'ampèremètre.

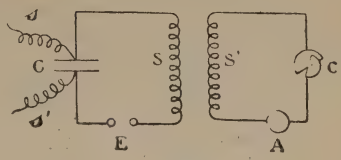

Fig. 43.

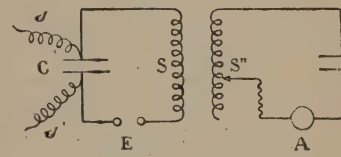

Fig. 44.

Laissant alors le circuit excitateur invariable, on modifie un des éléments caractéristiques du circuit récepteur, par exemple sa capacité C', (fig. 43) s'il est muni d'un condensateur à capacité variable, jusqu'à obtenir une indication maximum à l'ampèremètre [1]. Les impulsions répétées, dues au premier circuit, ont alors déterminé dans le second une intensité maximum. A ce moment, en calculant, pour chacun des circuits, le produit de la capacité par la self-induction, on trouve des produits égaux. *L'égalité des périodes correspond donc à la résonance.*

On peut aussi mettre en résonance deux circuits oscillants ouverts ou encore un circuit ouvert et un circuit fermé. Les deux circuits ouverts seront deux antennes réunies séparément au sol par leur partie inférieure, elles seront munies à leur base de spirales parallèles, disposées en regard l'une de l'autre. L'une des antennes, avec son éclateur, peut être considérée comme une antenne d'émission. Un ampèremètre thermique occupe la partie

1. Laissant constante, la capacité du circuit récepteur on peut aussi faire varier la self-induction en augmentant ou en diminuant le nombre des spires d'une spirale S", qui fait partie du circuit (fig. 44).

inférieure de la seconde. On excite l'antenne d'émission par son éclateur en laissant son circuit invariable. La seconde antenne, primitivement en repos électrique, entre par influence en oscillation ; on modifie alors sa constitution de manière à la mettre en résonance avec la première. Cette résonance est accusée par un maximum d'intensité observé sur l'ampèremètre thermique. A cette résonance correspond encore *l'égalité des périodes* pour les deux circuits associés [1].

Avantages de la résonance électrique.

La résonance électrique, ou l'accord entre deux circuits a pour effet, comme la résonance entre pendules ou entre diapasons, de rendre un circuit de réception *plus sensible* à l'action d'un circuit d'émission qui lui communique de l'énergie par une succession d'impulsions efficaces et favorise son entrée en oscillation. Il y a donc avantage à rendre égales les périodes des circuits de deux postes qui doivent entrer en correspondance.

Afin d'accroître la portée, on a recours à de très hautes antennes et à de puissantes décharges qui exigent une très forte dépense d'énergie. La résonance a pour effet de mieux utiliser cette énergie. D'autre part, si les stations sont nombreuses dans une même région, il importe

1. Pour étudier les phénomènes d'induction qui se produisaient au voisinage de son excitateur, Hertz s'était servi d'un cadre circulaire qu'il déplaçait dans le champ d'action des étincelles de décharge. Le cadre était formé avec un fil métallique dont les extrémités voisines étaient terminées chacune par une petite boule Des étincelles dues aux courants induits circulant dans le cadre, éclataient entre les deux boules.

Pour un même écart de ces deux boules, dans les mêmes conditions de position et d'orientation du cadre par rapport à l'excitateur, Hertz avait reconnu que les étincelles induites offraient leur maximum pour un *rayon déterminé de la circonférence du cadre*. Il en avait conclu qu'il s'agissait d'un phénomène de *résonance* et il avait donné à son cadre le nom de *résonateur*. Dans ce cas particulier il s'agissait d'une résonance entre un cadre fermé et le système d'un excitateur constitué par deux circuits ouverts concordants.

que les postes qui doivent rester en correspondance puissent avoir entre eux des communications exclusives et ne soient pas troublés par des émissions étrangères simultanées. Afin d'arriver à ce résultat, on attribue des longueurs d'ondes différentes aux divers groupes et on s'attache, par résonance, à ne recevoir dans un groupe que des signaux de sa longueur d'onde. On réalise de cette façon dans chaque groupe une *syntonisation* rigoureuse.

Il est essentiel toutefois de faire remarquer qu'il ne suffit pas d'accorder deux postes pour que leur correspondance ne risque pas d'être troublée. En effet, un poste puissant agit sur d'autres postes, sans accord préalable, par transmission d'une vive impulsion soudaine, produisant l'effet d'un choc. En outre, il y a lieu de montrer qu'un accord établi entre les périodes est sans efficacité pour conduire à la résonance, si les oscillations du corps oscillant excitateur s'amortissent trop rapidement.

Influence de l'amortissement sur la résonance.

Quand, en modifiant la constitution de deux corps oscillants, on a établi l'égalité de leurs périodes, l'un d'eux pris comme excitateur ne mettra pas l'autre en oscillation s'il n'effectue pas, pendant son action, un *nombre suffisant d'oscillations*. Pour que des ébranlements périodiques répétés, en accumulant leurs effets, augmentent graduellement l'amplitude des oscillations qu'ils ont provoquées, il faut qu'ils soient suffisamment prolongés. En résonance acoustique, cette condition est remplie avec deux diapasons A et B accordés, quand le diapason excitateur A émet un très grand nombre d'oscillations consécutives. Dans le cas d'une excitation maintenue pendant dix secondes, à raison

de 500 vibrations par seconde, le diapason vibrant A transmet par l'air 5.000 impulsions au diapason récepteur B. Chaque impulsion est individuellement minime, mais l'*addition de toutes les impulsions* aboutit à un écart dont l'amplitude devient suffisante pour que le diapason primitivement en repos, rende lui-même un son, grâce à sa constitution qui lui donne la même période qu'à l'excitateur. Ce son est entendu nettement et se prolonge seul si l'on vient à arrêter l'excitateur avec la main.

En télégraphie sans fil, dans une excitation directe, une succession aussi considérable d'impulsions est loin d'être réalisée par le *circuit oscillant d'émission*. Ce circuit oscillant se trouve dans des conditions analogues à celles d'un pendule pesant placé dans un milieu qui oppose une grande résistance à son mouvement ; il s'arrête après un très petit nombre d'oscillations rapidement décroissantes. On dit que ses oscillations sont très *amorties*.

L'énergie initiale, limitée, d'un corps vibrant se dissipe, en général, à la fois par divers frottements et par des mouvements communiqués au milieu ambiant. Pour les étincelles de décharge de condensateur, l'amortissement provient de la résistance opposée par le circuit de décharge et spécialement par l'intervalle gazeux compris entre les boules de l'éclateur. Une partie de l'énergie de la décharge est ainsi convertie en chaleur et les valeurs maxima de l'intensité de son courant alternatif décroissent rapidement.

Les oscillations de chaque étincelle d'émission, qui forment un groupe, appelé un *train*, s'affaiblissent si vite que la première oscillation du groupe contient la plus grande partie de l'énergie de la décharge totale ; le train ne comprend que quelques oscillations. Le rayonnement électrique de l'étincelle n'exerce pas alors l'effet qu'on

pourrait attendre de sa nature vibratoire. Comme la première oscillation est la seule importante, l'effet dû à un train est, sensiblement, *celui d'un choc unique*.

A chaque train qui lui vient du poste d'émission, le système électrique de l'antenne de réception est donc brusquement écarté de sa position d'équilibre et oscille avec la période qui convient à sa constitution.

D'après l'étude qui a été faite des antennes, la longueur d'onde des oscillations *libres* qui parcourent alors l'antenne de réception est la plus grande de celles que permet la longueur de l'antenne : la base de l'antenne est un ventre de courant et son sommet est un nœud, sans qu'il y ait de nœuds et de ventres intermédiaires.

Mise en vibration, l'antenne réceptrice n'effectue, elle-même, qu'un nombre très réduit d'oscillations électriques ; la cause principale de cette réduction est la grande résistance du contact imparfait.

Il est essentiel d'ajouter que l'intervalle de temps qui sépare deux trains d'émission, provenant de deux étincelles consécutives de l'éclateur, est tellement grand (fig. 45)

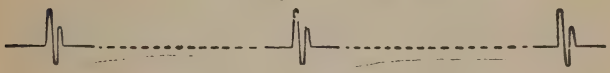

Fig. 45.

par rapport à la durée d'un des trains, que l'effet, déjà minime, qui est dû à chaque train, n'a pas laissé d'impression sur l'antenne réceptrice quand le train suivant agit à son tour.

Ces conditions spéciales suppriment tout avantage qui pourrait résulter d'un accord préalablement établi

entre les périodes qui sont propres aux deux antennes, puisqu'il ne peut se produire entre elles de résonance effective. L'antenne d'émission n'exerce donc pas, sur une antenne de réception accordée, un effet différent de celui qu'elle exerce sur une antenne quelconque, non accordée, située également dans son champ d'action.

La vibration électrique d'une antenne d'émission se comporte alors comme une *explosion* qui fait vibrer toutes les vitres d'alentour et ne leur impose aucune période ; la période de vibration de chacune des vitres est celle qui répond à son *mode individuel de fixation.*

Les remarques précédentes font comprendre pourquoi une antenne de réception n'est pas impressionnée exclusivement par une antenne d'émission avec laquelle elle a été particulièrement accordée.

Il faut ajouter qu'une antenne de réception est, comme une tige de paratonnerre, influencée par l'électricité atmosphérique ; toute décharge orageuse, quelles que soient sa provenance et sa période, y fait naître des oscillations électriques, comme dans tous les conducteurs de la région ; elle donne ainsi lieu à des signaux qu'on a dénommés *signaux parasites.* Par leur répétition et par leur intensité, les signaux parasites peuvent brouiller toute correspondance ; cela est fréquent dans les pays chauds. La multiplicité de ces décharges serait peut-être aussi, pour nous-mêmes, la cause de fâcheuses impressions si nous possédions un organe de réception des oscillations électriques.

IMPERFECTIONS DE L'EXCITATION DIRECTE

L'excitation directe, premier mode organisé de la télégraphie sans fil, avait donné le moyen de mettre aisément en relief les principaux caractères d'un nouveau procédé de communication qui utilisait un rayonnement électrique. L'excitation directe est, elle-même, fort imparfaite. Son dispositif est simple, mais le condensateur particulier dont l'antenne et le sol, séparés par l'éclateur, forment les armatures, n'a qu'une petite capacité et ne met en circulation, à l'occasion d'une de ses décharges, que *peu d'électricité*. Aussi, vu la *vaste dissémination* dans l'espace d'une énergie rayonnée qui est faible, la partie utilisée est définitivement tout à fait minime.

Étant donné que l'énergie d'une décharge de condensateur croît à la fois avec la différence de potentiel des armatures et avec leur capacité, si la capacité se trouve, avec le dispositif actuel, insuffisante, ne peut-on pas recourir à un accroissement de la différence de potentiel ?

Un *accroissement de la différence de potentiel*, la capacité restant la même, correspondrait à un plus grand écart des boules de l'éclateur et exagérerait la résistance de l'étincelle ; il y aurait alors à craindre la *suppression des oscillations* de la décharge. D'autre part, avec un accroissement de la différence de potentiel, la *déperdition* de la charge électrique par l'air et par les supports, deviendrait importante. Ces motifs firent donner la préférence à un accroissement de la capacité.

A l'émission, l'amplitude des oscillations de chaque décharge est très rapidement réduite par la grande résistance de l'intervalle d'air de l'éclateur ; à la réception, un

décroissement semblable des oscillations provoquées par induction est déterminé par la grande résistance du contact imparfait.

Par une *excitation indirecte*, on a réussi, à la fois, à accroître la quantité d'électricité des décharges et à favoriser la résonance en diminuant l'amortissement.

EXCITATION INDIRECTE

Pour les grandes et les moyennes portées on a adopté une excitation *induite* qu'on nomme *indirecte*. Dans ce mode spécial, la réception est également indirecte et chacun des deux postes comprend deux circuits distincts : l'un fermé, l'autre ouvert.

Au poste d'émission, de *fortes décharges* par étincelles sont produites dans le circuit fermé. L'énergie des décharges est dispersée par une antenne qui forme un circuit ouvert rayonnant associé par induction au circuit fermé.

Au poste de réception, l'antenne du circuit ouvert collecteur recueille une très petite partie de l'énergie rayonnée au départ. Ce circuit ouvert est associé par induction à un circuit fermé dans lequel est intercalé un contact imparfait. En dérivation sur le contact imparfait est branché latéralement un petit circuit qui comprend un élément de pile et un téléphone.

Dans chacun des deux postes, la *liaison par induction* du circuit ouvert et du circuit fermé se fait par deux spirales parallèles, dont l'une est *intérieure à l'autre*. Ces deux spirales constituent un transformateur sans noyau de fer. Chaque antenne, dont l'extrémité libre est dressée vers le ciel, se continue vers sa base par sa spirale d'induction, avant de plonger dans le sol.

Le circuit fermé du poste d'émission (figure 46) comprend un condensateur C, un éclateur E et une spirale d'induction L. On peut charger le condensateur avec une bobine d'induction. Les extrémités ss' du fil secondaire de la bobine aboutissent aux deux boules de l'éclateur. Le fil primaire p de la bobine est parcouru par un courant continu que fournit une batterie d'accumulateurs. Le manipulateur reste placé dans le circuit d'alimentation du fil primaire de la bobine ; il provoque à volonté des séries longues et des séries courtes d'étincelles qui jaillissent, à intervalles réguliers, entre les boules de l'éclateur [1].

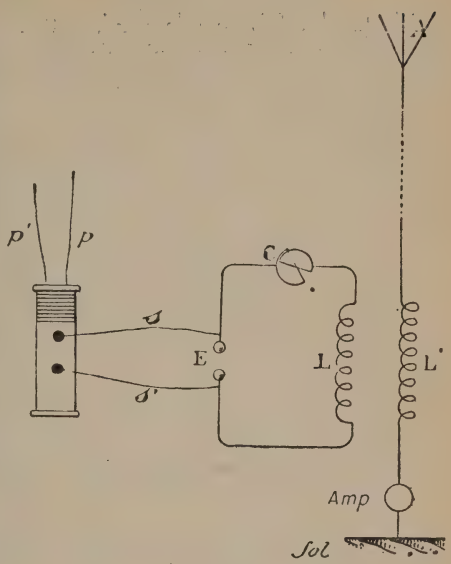

Fig. 46.

1. Le condensateur peut aussi être chargé par un courant continu de grande intensité qui n'éprouve pas de transformation par une bobine. La source de ce courant est : soit une batterie de nombreux accumulateurs, soit un groupe de machines dynamoélectriques associées en série

Le condensateur peut aussi être chargé par un courant alternatif. Ce mode spécial de charge n'est pas étudié ici

Toutes les fois que le condensateur se décharge par une étincelle entre les boules de l'éclateur, la circulation des courants alternatifs de la décharge dans la spirale L du transformateur qui appartient au circuit fermé, fait naître des courants oscillatoires induits dans la spirale associée L′ de l'antenne d'émission A. Les courants oscillatoires de l'antenne d'émission sont moins amortis que dans l'excitation directe parce qu'ils n'ont plus à surmonter une résistance d'étincelle. Les *oscillations d'émission*, devenues *plus nombreuses*, provoquent, dans l'antenne de réception, un plus grand nombre d'oscillations que par l'excitation directe.

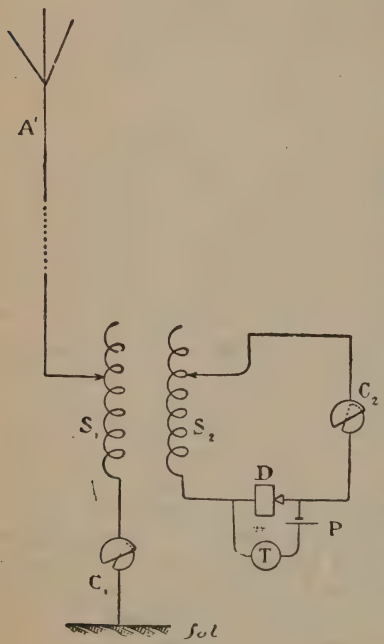

Fig. 47.

L'antenne de réception A′ (fig. 47) est, de son côté, débarrassée de la résistance du contact imparfait, qui se trouve maintenant transporté dans le circuit fermé du poste de réception.

Les oscillations induites dans l'antenne de réception s'*amortissent* donc actuellement *moins vite* qu'avec l'excitation directe.

En dernier lieu, l'induction qui s'exerce au poste de réception, entre les spirales associées S_1 et S_2 de l'antenne et du circuit fermé, développe, dans le circuit fermé, des oscillations que le *contact imparfait* D *redresse*. Les oscillations de chaque train font parler le téléphone T, de la même manière que dans l'excitation directe.

Dans l'excitation directe, on n'établissait qu'un seul accord ; il se rapportait aux deux antennes. L'excitation indirecte demande trois accords. Le circuit producteur d'étincelles est d'abord accordé avec le circuit de son antenne. En second lieu, comme dans l'excitation directe, l'antenne de réception doit être accordée avec l'antenne d'émission. Enfin, l'antenne de réception et le circuit fermé du contact imparfait sont accordés entre eux.

DÉDOUBLEMENT DE LA RADIATION D'ÉMISSION

Le premier accord est réalisé, à la façon ordinaire, en donnant séparément la même période au circuit inducteur fermé et au circuit de l'antenne radiante ; mais, après que les opérations qui se rapportent à ces accords ont été faites, il survient une complication, lorsqu'on met en liaison étroite les spirales des deux circuits associés.

Si l'on a *serré* cette liaison, pour que les oscillations de l'antenne d'émission reçoivent du circuit excitateur une énergie qui accroisse suffisamment leur amplitude, le circuit excitateur et l'antenne n'ont plus, au moment d'une décharge, des mouvements oscillatoires de même

période ; leurs périodes respectives ont pris *deux valeurs peu différentes*, qui comprennent entre elles la période commune primitivement imposée séparément à chacun des deux circuits oscillants avant leur rapprochement.

Il en résulte que les oscillations *de chaque circuit* présentent des alternatives régulières de maxima et de minima d'amplitudes, les maxima pour l'un des circuits ayant lieu au moment des minima pour l'autre (fig. 48). Cette forme complexe est due pour chaque circuit à la superposition de deux mouvements oscillatoires de périodes peu différentes, qui est semblable à celle du phénomène des *battements* en acoustique.

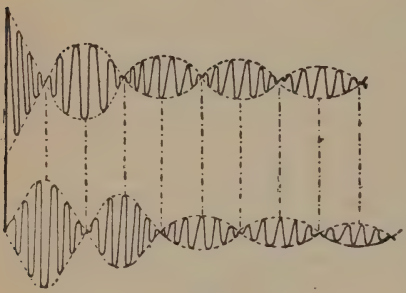

Fig. 48.

Le même effet se produit pour tout groupe de deux systèmes oscillants de même nature, pesants, sonores ou autres lorsque les deux systèmes ont été accordés séparément sur une même période et rapprochés ensuite en liaison serrée. Il provient de ce qu'une forte action exercée par une partie sur l'autre en vertu de leur liaison, est suivie d'une forte réaction de l'autre sur la première.

Deux radiations de périodes différentes étant ainsi rayonnées par l'antenne d'émission, il n'est possible d'accorder l'antenne de réception que sur l'une ou sur l'autre ; l'énergie de celle qui n'est pas choisie est inutilisée. Les longueurs

d'onde des deux oscillations sont d'autant plus différentes que le couplage est plus serré. Elles arrivent à être très peu différentes pour un couplage suffisamment lâche, mais comme, dans ce cas, le circuit radiateur ne reçoit plus que peu d'énergie du circuit excitateur, l'énergie radiante de l'antenne se trouve fort amoindrie.

En tenant compte des remarques précédentes, après avoir fait en sorte que le circuit ouvert de l'antenne de réception et le circuit fermé du contact imparfait aient séparément pour période celle des deux périodes d'émission qui a été choisie, on associe les deux circuits du poste de réception en rendant leur *couplage lâche*, afin qu'ils restent d'accord sur la même période.

Longueur d'onde d'émission.

L'augmentation de l'énergie des décharges de l'éclateur exige un accroissement de la capacité du condensateur ; il en résulte un accroissement de la période des oscillations de l'émission et par conséquent de leur longueur d'onde.

Les quantités considérables d'énergie que réclame un rayonnement électrique de longue portée ont fait donner aux antennes radiantes une grande capacité et une grande surface, ces conditions correspondent aussi aux grandes longueurs d'onde. Les *grandes longueurs d'onde*. se prêtent d'ailleurs très bien aux transmissions radiotélégraphiques et elles ont l'avantage de permettre au rayonnement de *contourner* plus aisément *les obstacles*.

FORMES DES ANTENNES

L'organe rayonnant et l'organe collecteur sont de même nature. Ce sont les *antennes*. Primitivement, une antenne était un fil de cuivre nu, dressé verticalement. La forme a été modifiée pour faire croître l'énergie émise, mais le nom d'antenne a été conservé.

Une antenne formée d'un fil unique vertical a une portée qui croît avec sa hauteur [1]. Une antenne met en oscillation une plus grande masse d'éther si elle comprend plusieurs fils distincts. Son rayonnement augmente avec la longueur et l'écartement des fils. La forme des antennes multifilaires varie surtout avec la nature des supports dont on peut disposer.

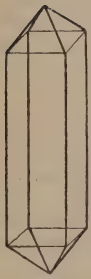

FIG. 49.

L'*antenne prismatique* (fig. 49) comprend quatre fils égaux et parallèles, écartés les uns des autres. La longueur d'onde de l'antenne est plus grande que quatre fois la longueur de l'un des fils. Le support unique peut être un mât de navire.

L'*antenne en nappe* (fig. 50) consiste en fils disposés dans un

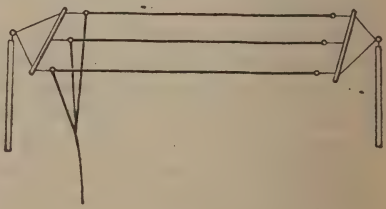

FIG. 50.

1. La longueur d'onde d'une antenne unifilaire verticale est égale à cinq fois sa hauteur. La hauteur étant pratiquement limitée, on augmente la longueur d'onde en enroulant en spirale l'extrémité de la partie de l'antenne qui aboutit à la boule supérieure de l'éclateur. Quelques spires accroissent notablement la self-induction L de l'antenne et par conséquent la période.

même plan, se réunissant à leur partie inférieure. Elle a deux supports isolants.

L'*antenne en pyramide renversée* (fig. 51) est un vaste entonnoir en fils métalliques qui convergent en une pointe dirigée en bas ; l'ensemble des fils est tendu sur les côtés d'un quadrilatère compris entre les sommets de quatre supports qui peuvent avoir une grande hauteur.

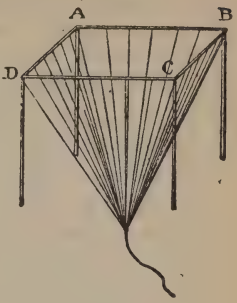

Fig. 51.

L'*antenne en parapluie* est portée par une tour unique (fig. 52) isolée électriquement du sol. Des câbles partent du sommet en divergeant et sont fixés au sol par des cordes isolantes ; leur projection horizontale couvre souvent une grande surface.

Fig. 52.

Les types précédents sont cités à titre d'exemples. Il faut remarquer que les lignes télégraphiques, les lignes téléphoniques, les lignes de transmission de courants peuvent

servir d'antennes. Il en est de même d'un fil conducteur quelconque, qui est isolé à une de ses extrémités et communique à son autre extrémité avec un appareil émetteur ou récepteur.

Une *antenne de réception* est moins sensible aux décharges atmosphériques si elle a une petite hauteur. Elle doit toutefois s'élever au-dessus des masses métalliques qui l'environnent et n'avoir avec elles aucune communication.

La *prise de terre* de l'éclateur s'établit par un réseau de conducteurs métalliques enterrés dans le sol et couvrant une grande surface. La profondeur à laquelle les courants s'engagent varie avec la nature du sol ; la propagation est notablement meilleure sur mer que sur terre.

Sur les navires de l'air, le sol ne peut être relié à l'antenne, on lui substitue, sous le nom de *contrepoids électrique*, la masse métallique de l'appareil. Le fil métallique de l'antenne est tendu à son extrémité libre par un poids ; il est enroulé au repos sur un rouet isolant, on le déroule plus ou moins pour établir un accord avec différents postes. Il s'incline pendant le vol.

EXCITATION INDIRECTE AVEC CHOC

L'excitation induite ou indirecte avait été un grand progrès. En premier lieu, l'*énergie* mise en action pouvait être *considérablement accrue*. En second lieu, puisqu'il faut à l'émission et à la réception un nombre suffisant de mouvements oscillatoires consécutifs pour établir une résonance, la *réduction de l'amortissement* avait été avantageuse. Toutefois, la simplicité d'une période unique avait été perdue.

Tout en conservant l'excitation indirecte et les ressources

qu'elle procure au point de vue de l'accroissement de l'énergie et de l'accroissement de la longueur d'onde, on a pu revenir à une période unique, comme en excitation directe, et obtenir, en même temps, à l'émission de chaque étincelle, un nombre d'oscillations beaucoup plus grand que dans l'excitation indirecte ordinaire. Ces résultats ont été atteints en rendant, *après une très brève excitation, l'antenne d'émission indépendante* de son circuit excitateur.

Par l'emploi d'un éclateur à très petite distance explosive et à durée d'étincelle très faible, on est arrivé à ne laisser subsister, à peu près, que la première des oscillations que provoque dans le circuit excitateur chacune des étincelles de l'éclateur. Il est vrai que l'énergie totale, qui est communiquée à l'antenne d'émission, se trouve alors limitée à celle que fournit le début de l'excitation, mais on est parvenu à obtenir un rendement suffisant, en maintenant, entre le circuit excitateur et le circuit radiateur, une liaison assez serrée. Dans ces conditions, au moment où l'excitation exercée sur l'antenne est supprimée, le circuit excitateur lui a déjà cédé une partie importante de l'énergie de la décharge.

Vu la durée extrêmement courte de l'excitation, la force agissante exerce l'effet d'un *choc*. On sait qu'alors le circuit de l'antenne d'émission entre *librement* en oscillation électrique, avec sa période propre et avec son amortissement propre. Les oscillations de l'antenne ont donc ici une période unique, et elles sont d'ailleurs peu amorties, puisque l'antenne ne possède plus l'éclateur. Les oscillations se succèdent, jusqu'au moment où toute l'énergie communiquée à l'antenne par le circuit excitateur a été dissipée. Un train de ces oscillations d'émission comprend ainsi un grand nombre d'oscillations (fig. 53).

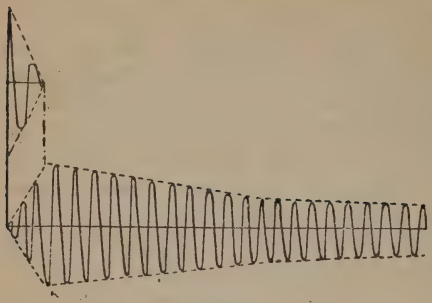

Fig. 53.

D'autre part, le contact imparfait, restant séparé de l'antenne de réception, n'y amortit plus par sa résistance, les oscillations induites que provoque l'antenne d'émission, à travers l'espace qui sépare les deux antennes. Bien entendu, l'antenne d'émission et l'antenne de réception ont été *préalablement accordées*. Comme précédemment, le circuit fermé de réception est accordé avec le circuit ouvert de son antenne et il lui est associé par un couplage lâche. Ces deux circuits ont ainsi une période commune, qui est celle de l'antenne d'émission. En raison du redressement produit par le contact imparfait, la membrane du téléphone fait entendre, comme à l'ordinaire, un choc pour chaque train.

Éclateur tournant.

Pour réaliser les conditions de l'excitation par choc, on fait souvent usage d'un éclateur tournant. Un disque circulaire, qui tourne autour d'un axe central perpendiculaire à son plan, porte sur sa périphérie une suite de saillies équidistantes. La circonférence des saillies passe devant une électrode fixe de l'éclateur et chacune des

saillies devient à son tour la seconde électrode. Une étincelle éclate au passage de chaque saillie. L'intervalle de succession des étincelles reste invariable si le moteur qui fait tourner le disque est bien régulier et il est extrêmement réduit par une très grande vitesse de rotation. Enfin, la faible distance des saillies à l'électrode fixe rend la *distance explosive fort petite*, c'est-à-dire l'étincelle fort courte.

Quelquefois, c'est entre deux disques D_1 et D_2, perpendiculaires à son plan, que tourne le disque D porteur des saillies. Un petit mouvement continu de rotation est communiqué aux disques D_1 et D_2 eux-mêmes, afin que les étincelles éclatent constamment entre des masses froides (fig. 54).

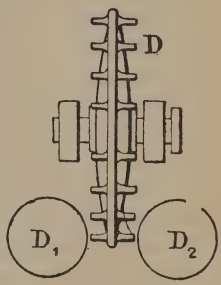

Fig. 54.

Il s'agit ici de très grandes longueurs d'onde et, par conséquent, de périodes d'oscillation notablement plus grandes que celles des petits postes ; c'est pourquoi, avec une assez grande vitesse de rotation du disque D, l'étincelle, très brusquement coupée, réduit la décharge oscillante à une ou deux oscillations.

Les trains d'oscillations des étincelles d'émission sont, dans l'excitation indirecte avec choc, incomparablement moins amortis que dans l'excitation indirecte ordinaire. Malgré cela, chaque train reste séparé du suivant par un intervalle de temps qui est encore très considérable par rapport à sa propre durée et l'ébranlement oscillatoire qu'il produit sur l'antenne réceptrice peut être dissipé

quand l'ébranlement suivant se présente. C'est donc principalement par les oscillations d'un même train que la résonance s'établit entre les deux antennes ; *elle se répète pour chacun des trains successifs.*

Étincelles fréquentes ou musicales.

Avec les anciens dispositifs, la fréquence des étincelles d'émission ne dépassait pas une centaine ; l'éclateur tournant peut être animé d'une vitesse qui en donne de 1.000 à 1.500 par seconde. Cette émission est dite à *étincelles fréquentes*, par opposition avec l'autre, qu'on nomme émission à *étincelles rares.*

Une grande fréquence d'étincelles est précieuse sous certains rapports. Le nombre des trains dans le circuit du contact redresseur, et, par conséquent, aussi le nombre des chocs au téléphone est égal au nombre des étincelles qui correspondent à l'envoi d'un signal, point ou trait. Or, si courte que soit au poste d'émission la durée d'une fermeture du manipulateur, elle comprend, avec les étincelles fréquentes, un nombre d'étincelles assez grand pour que tout signal, même très court, reçu au téléphone, au lieu d'être saccadé comme avec les étincelles rares, ait la note de la fréquence des étincelles. Avec un éclateur tournant bien réglé, la hauteur du son conserve une grande fixité. Les étincelles sont, dans ces conditions, qualifiées *étincelles musicales.* La source électrique de charge étant une source continue, telle qu'une batterie d'accumulateurs, pour un nombre N de tours du disque par seconde et un nombre p de dents, la fréquence des étincelles est pN.

Une différence dans la fréquence des étincelles, attribuée

à différents postes d'émission, fait varier la note des sons au téléphone et renseigne sur la *provenance* d'une dépêche. Lorsque deux transmissions indépendantes se font sur une même longueur d'ondulation, leur réception simultanée peut être sans inconvénient. En effet, on s'habitue assez vite, si la note musicale diffère suivant le poste, à n'entendre, à la lecture au son, que les signaux du poste avec lequel on doit rester en correspondance.

Les étincelles musicales sont, d'autre part, avantageuses au point de vue de l'*élimination des sons parasites*. Il est utile d'y insister. La résonance ne devait pas servir seulement à augmenter la portée des communications, mais aussi à obtenir la syntonisation. Si une bonne syntonisation facilite une correspondance exclusive entre deux postes, en la débarrassant d'émissions faites sur des longueurs d'onde différentes de la longueur d'onde adoptée, elle ne supprime pas les sons parasites, qui sont quelquefois extrêmement gênants. Mais les sons parasites proviennent de décharges atmosphériques, ils ont lieu par chocs isolés et ne sont que des *bruits sans caractère musical*. Il est donc possible de les négliger dans une réception à étincelles musicales, au moins lorsqu'ils ne sont ni trop forts ni trop nombreux.

Les étincelles fréquentes permettent enfin d'élever le *rendement* d'un poste. On conçoit que le nombre des signaux d'un poste d'émission peut être accru avec le nombre des étincelles par seconde, puisqu'un signal, même fort court, mettra en jeu quelques étincelles. En augmentant le nombre des étincelles, on a donc le moyen d'accroître le nombre des signaux. On y parvient avec des appareils d'émission à grande vitesse.

Il ne faut pas oublier qu'un accroissement important de la fréquence des décharges, pour un grand trafic,

exige un *renforcement de l'énergie* du circuit excitateur de l'appareil d'émission.

ACCROISSEMENT DE LA VITESSE DE TRANSMISSION

Afin d'obtenir la rapidité de transmission que réclame le trafic d'une grande station radiotélégraphique, il a fallu, d'une part, accélérer l'émission et, d'autre part, user à la réception de procédés spéciaux pour séparer des signaux très rapprochés.

Mécanisme d'émission

Comme cela se fait pour les grands cables sous-marins, les dépêches à expédier sont inscrites à l'avance, *par perforation*, sur une bande de papier qui passe, à cet effet, sous les touches d'un clavier alphabétique. Abaissée à la main, une touche compose en une seule frappe les signes de sa lettre. Un trou de très petit diamètre correspond à un point, un trou plus grand à un trait. Convenablement perforée, la bande de papier peut être ensuite, pour l'émission, déroulée rapidement par un transmetteur automatique entre deux cylindres conducteurs que chaque trou de perforation met en contact pour laisser passer le courant d'émission. Le passage est plus long pour un trait que pour un point. L'expédition est possible ainsi, à grande vitesse, et la réception a lieu dans les mêmes conditions.

Réception par enregistrement.

Comme la réception au son est pénible, puisque le lecteur au son doit conserver en permanence son récep-

teur appliqué contre l'oreille, la recherche de l'enregistrement des signaux avait été l'objet de nombreux essais.

Dans le cas d'une réception à grande vitesse, le nombre des signaux reçus par minute est d'ailleurs trop grand pour qu'un lecteur au son puisse les suivre et l'enregistrement est indispensable. L'enregistrement se fait par la photographie ou à l'aide d'un phonographe.

Méthode photographique. — On emploie habituellement un galvanomètre extrêmement sensible, à indications instantanées. C'est, par exemple, un galvanomètre, dit *à corde*, dans lequel un fil conducteur très fin est tendu entre les pôles très rapprochés d'un puissant aimant. Si l'on fait traverser le fil tendu par les courants redressés successifs qui mettaient en vibration la membrane du téléphone dans la réception ordinaire, l'action magnétique de l'aimant écarte brusquement le fil de sa position d'équilibre au passage de chaque train. En raison de sa très faible inertie, le fil conducteur revient à sa position d'équilibre dans l'intervalle de deux trains.

Le fil conducteur étant éclairé par un faisceau lumineux, l'image qu'une lentille en donne se projette sur une pellicule photographique qui se déroule rapidement, parallèlement au fil. Chaque train d'oscillations est signalé par un intervalle clair provenant d'un déplacement du fil entre deux de ses positions d'équilibre consécutives.

Méthode phonographique. — La membrane du téléphone récepteur est disposée devant le cornet d'un phonographe. Le cornet porte un diaphragme enregistreur muni d'une pointe aiguë qui appuie sur un cylindre de cire tournant autour d'un axe. A chaque train, la vibration de la membrane du téléphone se communique au diaphragme enregistreur et la pointe aiguë perce dans la cire des trous dont le

nombre par signal est proportionnel à la fréquence du son qui était entendu au téléphone. Il y aura, par exemple, vingt trous pour un point et soixante pour un trait. Pour une même fréquence, la distance entre deux trous consécutifs augmente avec la vitesse de rotation du cylindre du phonographe.

Quand on veut reproduire au son une dépêche inscrite, on substitue au diaphragme enregistreur du cornet un diaphragme répétiteur, à pointe mousse, puis on donne au cylindre du phonographe la vitesse de déroulement qui convient à un régime normal de lecture.

RÉSULTATS DE LA TÉLÉGRAPHIE PAR ÉTINCELLES

Disposant d'un révélateur d'ondes électriques suffisamment sensible, la télégraphie sans fil a trouvé, à ses débuts, dans les étincelles de décharges de condensateurs, des sources d'oscillations périodiques de haute fréquence et l'emploi de ces étincelles a conduit à la réalisation d'un procédé de communication entre deux postes qui n'ont entre eux aucune liaison apparente. Le développement de la télégraphie par étincelles, ou par *ondes intermittentes* plus ou moins *amorties*, a présenté trois étapes dans son organisation.

La première étape, à excitation directe, offre une installation fort simple, avec ses deux antennes verticales dont l'une comprend l'éclateur et l'autre le contact imparfait. Vu la faible capacité électrique du conducteur déchargé, la portée est médiocre comme l'énergie dépensée. La longueur d'ondulation est unique et connue aisément, mais un trop fort amortissement s'oppose à toute résonance,

alors même que les deux postes ont été accordés. En définitive, les divers groupes de postes ne restent pas indépendants les uns des autres.

Dans une *deuxième étape*, l'excitation est indirecte ; à l'émission, comme à la réception, une antenne est associée à un circuit fermé. Les antennes se sont étendues en hauteur et en surface ; la longueur d'onde a grandi ; la portée est devenue considérable, ainsi que l'énergie dépensée. Mais une liaison très accentuée de l'antenne d'émission et de son circuit d'excitation a imposé deux longueurs d'onde, entre lesquelles il faut choisir. La résonance reste fort incomplète, et, pour cette raison, les divers postes ne sont pas suffisamment indépendants. Les signaux parasites sont, comme dans la première étape, fort gênants.

La *troisième étape* apporte des avantages importants. L'excitation est encore indirecte, mais elle agit par choc sur l'antenne d'émission. On se trouve, alors, par des artifices bien étudiés, ramené à une onde d'émission unique et à une oscillation libre de l'antenne de réception, comme dans la première étape. L'amortissement est, cette fois, très réduit dans chacune des antennes, et la résonance est notablement améliorée. L'emploi des étincelles musicales, surtout à sons aigus, rend moins importunes les décharges parasites.

En résumé, en augmentant graduellement, considérablement, la puissance des décharges de condensateur à l'émission, en développant avec beaucoup d'ampleur la surface rayonnante et absorbante des antennes, on a réussi à franchir, sur la surface du globe, par télégraphie sans fil, directement, sans intermédiaire, de très grandes distances.

Cependant, de nouveaux progrès étaient encore attendus. Une *correspondance exclusive* entre deux postes n'était pas

encore suffisamment obtenue. Même avec des étincelles agissant par choc, en excitation indirecte, un train d'oscillation de l'antenne d'émission s'amortissait encore trop vite pour établir une *résonance parfaite*. Afin que les appareils récepteurs ne soient pas impressionnés par des rayonnements provenant d'émissions à longueurs d'onde trop différentes, il était préférable qu'au lieu d'être mise en oscillations par saccades, l'antenne d'émission fût maintenue en *oscillations entretenues*, à amplitude constante, sans éclateur et sans étincelles.

On doit faire remarquer, qu'avec les ondes entretenues, l'énergie dépensée, étant uniformément répartie sur tout le temps du fonctionnement de la source, l'énergie consacrée à un signal est, à puissance moyenne égale, moindre qu'avec l'emploi d'éclatements d'étincelles.

La longueur d'onde restant alors entretenue et constante, on profitera de toutes les ressources que procure l'utilisation de la résonance, pour accorder d'une façon parfaite le circuit émetteur et le circuit récepteur.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL PAR ONDES ENTRETENUES.

Un rayonnement à ondes entretenues peut provenir d'une machine à courants alternatifs de haute fréquence. Dans une excitation directe, un des pôles de la machine est relié à une antenne d'émission, tandis que l'autre pôle communique avec la terre. Il n'y a plus ni éclateur ni étincelles. Dans la télégraphie par ondes entretenues, le poste de réception peut être, sans changement, celui de la télégraphie par étincelles.

La vitesse de rotation de la machine à courants alternatifs restant constante, la période du courant d'émission et sa longueur d'onde ne varient pas. Avec un manipulateur interposé entre l'antenne d'émission et le pôle de la machine qui est relié à cette antenne, des oscillations sont débitées régulièrement le long de l'antenne. Mais la source d'oscillations entretenues ne fournissant pas elle-même, comme un appareil à décharges intermittentes, des trains d'oscillations espacés dont le nombre est plus grand pour un trait que pour un point, la continuité des oscillations maintient, à la réception, après redressement par un contact imparfait, la plaque du téléphone attirée pendant toute une fermeture du manipulateur. Rien ne distingue plus alors, au son, une fermeture courte d'une plus longue. Dans ces nouvelles conditions, pour obtenir des signaux brefs ou longs, on doit adjoindre à la haute fréquence du courant oscillatoire de la source, une fréquence auxiliaire beaucoup plus basse.

TIKKER

Un premier procédé consiste à interrompre le courant oscillatoire à des intervalles très rapprochés et à laisser seulement passer, dans la suite des oscillations entretenues, des *tranches égales*, équidistantes, en nombre de 800 à 1.000 par seconde. Dans l'intervalle de deux tranches consécutives la membrane du téléphone revient à sa position d'équilibre. L'interrupteur vibrateur, appelé *tikker*, est placé, par exemple, dans le circuit du contact sensible et du téléphone.

Dans ces conditions, si le manipulateur d'émission restait constamment ouvert, aucun courant ne circulant dans le circuit récepteur, le téléphone ne parlerait pas. Si le manipulateur restait constamment fermé, le contact imparfait de réception redresserait les courants successifs des tranches et le téléphone ferait entendre une succession de chocs équidistants, donnant la note de la fréquence de l'interrupteur automatique. Quand le manipulateur est fermé pendant un temps plus ou moins long, les tranches découpées des oscillations produisent, sur le téléphone, pendant les fermetures, une action semblable à celle des trains d'oscillations d'une transmission par étincelles séparées. Conformément à la durée du débit commandé par le manipulateur, le nombre des chocs au téléphone permet de distinguer les traits des points. L'énergie que l'antenne reçoit de la machine à ondes entretenues, dans les intervalles des tranches, est inutilisée.

HÉTERODYNE

On emploie de préférence un autre genre de superposition d'une fréquence plus basse à la fréquence de la source. La méthode consiste à installer, au voisinage de l'antenne de réception, une source spéciale d'oscillations entretenues, dite *hétérodyne*, qui émet elle-même des oscillations de haute fréquence, dont l'opérateur peut régler l'amplitude et la période. Si l'on a amené l'amplitude et la période de ces oscillations auxiliaires à être très voisines de l'amplitude et de la période des oscillations induites de l'antenne de réception, il y a, pendant chaque fermeture du manipulateur, superposition, dans l'antenne de réception, d'oscillations induites dues au poste d'émission et d'oscillations induites dues à l'hétérodyne ; elles forment deux groupes qui ne sont pas perceptibles séparément, mais le résultat de leur superposition produit des *battements* perceptibles. (fig. 55).

Fig. 55.

En effet, sur un grand nombre d'oscillations provenant de deux mouvements oscillatoires distincts, l'un de fréquence n, l'autre de fréquence n', d'amplitudes peu différentes, il y a, si n et n' sont assez voisins, des renforcements et des affaiblissements périodiques de quelques-unes seule-

ment des vibrations ; ces renforcements et affaiblissements sont en nombre $n - n'$ [1] (fig. 55). Pour une différence de 500 oscillations par seconde entre les deux groupes d'oscillations qui sont induites dans l'antenne de réception, une note de fréquence 500 est entendue au téléphone tant que le débit se poursuit à manipulateur fermé. C'est, avec cette note des renforcements, que les fermetures du manipulateur, brèves ou longues, font entendre des sons brefs ou longs, qui représentent des points ou des traits. La manœuvre du manipulateur reste la même que pour la télégraphie avec fil de ligne en courant continu.

L'emploi de l'hétérodyne produit une *amplification* à la réception. L'énergie de cette amplification est empruntée à la source de l'hétérodyne, c'est une énergie locale additionnelle, étrangère au système d'émission. L'héterodyne compose sa puissance propre avec celle des signaux. Les oscillations de l'hétérodyne, destinées à *interférer* avec les oscillations de l'antenne de réception, doivent leur être comparables au point de vue de l'amplitude ; la source qui les entretient devra donc être faible par rapport à la source des oscillations entretenues qui parcourent l'antenne d'émission.

Un poste récepteur à hétérodyne ne reçoit pas les signaux d'un poste émetteur à oscillations entretenues dont la longueur d'onde diffère sensiblement de la longueur d'onde de l'hétérodyne. La réception par battements produit donc des effets de sélection avantageux pour la correspondance exclusive entre certains postes.

1. Dans le cas de mouvements vibratoires sonores, les *battements* sont distingués par l'oreille, si $n - n'$ est suffisamment petit. Lorsque la différence $n - n'$ n'est plus très petite, l'ensemble des battements, alors très rapprochés, donne un son résultant, de fréquence $n - n'$.

ONDES ENTRETENUES DES MACHINES ALTERNATIVES

Quelle peut être une machine à courants alternatifs à employer directement pour des communications radiotélégraphiques par ondes entretenues ?

Dans les premières années de la télégraphie sans fil, l'idée n'avait pas pu venir de substituer des courants d'alternateurs aux courants alternatifs d'extrême fréquence, produits par des décharges de condensateurs. En effet, les courants des alternateurs industriels destinés à l'éclairage et à la traction, ont une fréquence comprise entre 50 et 150, alors qu'un poste radiotélégraphique à antenne rectiligne de 75 mètres ou d'une longueur d'onde de 300 mètres exigerait des courants alternatifs d'une fréquence égale à un million.

On ne pouvait songer à construire à la façon ordinaire des alternateurs d'une fréquence aussi élevée. En effet, dans la construction usuelle, en face d'un enroulement induit fixe, on fait tourner uniformément, autour d'un axe qui passe par son centre, une *couronne annulaire de pôles* d'électroaimants, alternativement nord et sud, régulièrement espacés. La période de la force électromotrice induite est le temps qui sépare les passages de deux pôles consécutifs de l'inducteur devant un même point de l'enroulement induit. La fréquence du courant, qui est l'inverse de la période, croît ainsi avec le nombre des pôles de la couronne annulaire et avec la vitesse de rotation. Comme le diamètre de l'anneau augmente avec le nombre des pôles, les effets de la force centrifuge limitent, soit le nombre des pôles, soit la vitesse de rotation. L'accroissement du nombre

des pôles sur une circonférence donnée diminue l'étendue de chaque pôle et l'induction dans l'induit.

D'ingénieuses multiplications, indirectes, de la fréquence, ont, il est vrai, fait obtenir, avec des machines déjà puissantes, des oscillations entretenues dont la fréquence atteignait le nombre de 50.000.

Pour les très longues portées, on a dû, à la fois, mettre en jeu des énergies très puissantes et donner aux antennes une énorme capacité, exigeant des hauteurs et des surfaces considérables. La capacité des condensateurs et des antennes correspondait, pour les radiations utilisées, à de très grandes longueurs d'onde. De la longueur d'onde de 6 kilomètres, adoptée pendant une dizaine d'années dans plusieurs grands postes, on est arrivé récemment à 20, puis à 30 kilomètres, ce qui fait tomber la fréquence à 10.000. L'emploi de puissantes machines à courants alternatifs, de 10.000 vibrations par seconde, sans multiplication, s'impose dans les grands postes.

Si, d'après les nombres précédents, la télégraphie par étincelles est destinée à disparaître pour les grands postes, ne pouvait-on pas supposer que, faute de mieux, elle se maintiendrait pour les petits postes? Cela n'est plus probable, car, pour les postes à courte antenne, ou à petite longueur d'onde, dont la portée ne dépasse pas quelques centaines de kilomètres, un procédé nouveau, inattendu, est venu s'imposer d'emblée. Ce procédé, d'origine américaine, qui a apporté des ressources exceptionnelles en radiotélégraphie, a eu pour point de départ l'introduction d'un redresseur spécial de courants oscillatoires : la lampe à deux électrodes.

LAMPE A DEUX ÉLECTRODES

La lampe à deux électrodes est une lampe *à incandescence*, primitivement à filament de charbon, actuellement à filament de tungstène, convertie en lampe à deux électrodes par une plaque de nickel qui pénètre, comme le filament, dans le vide de l'ampoule. Cette plaque, qui reste froide, tandis que le filament est porté à l'incandescence, a été appelée la seconde électrode. Le filament étant *incandescent*, la lampe offre une particularité spéciale, observée par Edison et dite *effet Edison*. Quand la plaque est reliée, en dehors de l'ampoule, au *pôle positif* d'une pile de plusieurs éléments associés en série (fig. 56) qui la maintient à un potentiel supérieur au potentiel du filament, l'intervalle vide qui sépare la plaque du filament devient *conducteur* et un courant peut aller, dans l'ampoule, de la plaque au filament.

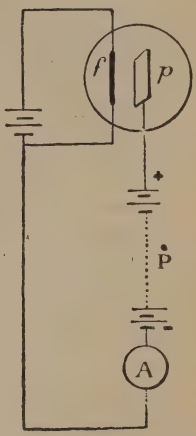

Fig. 56.

Le filament est rendu incandescent par quelques accumulateurs. La pile de charge de la plaque comprend un assez grand nombre d'éléments ; son pôle négatif est, en dehors de l'ampoule, relié au filament par un fil conducteur, sur le trajet duquel est placé un milliampèremètre.

L'intensité de ce courant, appelé courant *plaque-filament*,

varie avec le nombre des éléments de la pile et avec l'incandescence du filament. Aucun courant ne circule dans l'espace vide de l'ampoule et dans le conducteur qui relie la plaque au filament quand le potentiel de la plaque est inférieur au potentiel du filament. Le filament, parcouru par le courant qui le porte à l'incandescence et qu'on appelle ici *courant de chauffe*, présente sur sa longueur, comme toute portion conductrice, que parcourt un courant électrique continu, une charge électrique qui passe régulièrement du positif au négatif entre le pôle positif et le pôle négatif de sa pile de chauffe. Il suffit que la plaque soit positive par rapport à une faible longueur du filament, pour qu'il y ait un petit courant dans le circuit plaque-filament. La pile de chauffe n'intervient que pour rendre le filament incandescent.

Si, pour la charge de la plaque, la pile à courant continu est remplacée par une source à force électromotrice alternative, l'ampoule de la lampe à deux électrodes à filament incandescent ne se laisse traverser que par les alternances qui rendent la plaque positive. La lampe à deux électrodes a *donc* une *conductibilité unipolaire*, elle se comporte comme un *redresseur* de courant.

A une température donnée du filament, on obtient une même intensité du courant plaque-filament avec un nombre d'éléments pour la charge de la plaque, d'autant moindre que le vide a été poussé plus complètement dans l'ampoule. La charge positive de la plaque restant la même, le courant plaque-filament, pour un même degré de vide, augmente avec la température du filament. Les intensités du courant sont, dans tous les cas, indiquées par le milliampèremètre du circuit.

LAMPE A TROIS ÉLECTRODES

Une remarquable et importante addition a étendu les propriétés de la lampe à deux électrodes, spécialement en ce qui concerne la télégraphie sans fil ; c'est l'introduction, dans le vide de l'ampoule, entre le filament et la plaque, d'une *troisième électrode*, qui reste froide comme la seconde. La troisième électrode est souvent un cadre métallique, parallèle à la plaque, sur lequel des fils métalliques fins sont tendus parallèlement à deux côtés du cadre. Cette forme spéciale a fait donner à la troisième électrode le nom de *grille*. Quelle que soit sa forme, la troisième électrode est assujettie à offrir des intervalles vides, à travers lesquels la plaque positive peut continuer à exercer son action spéciale sur le filament.

La plaque et la grille, ordinairement toutes les deux en nickel, sont des conducteurs libres dans l'ampoule ; chacune en sort par un fil conducteur, qui va au pôle négatif de la batterie de chauffe du filament. La grille peut être chargée électrostatiquement par une pile placée sur le trajet grille-filament, comme l'est la plaque par une pile placée sur le trajet plaque-filament (fig. 57).

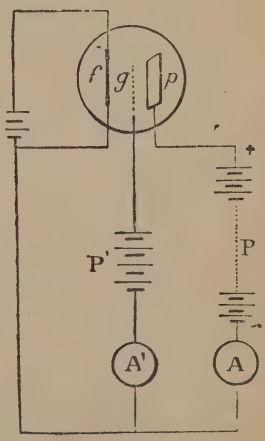

Fig. 57.

Quand la grille est chargée, comme la plaque, par un pôle positif de pile, l'action de la grille sur le filament renforce, à l'intérieur de l'ampoule, l'action de la plaque et augmente ainsi le *courant de plaque*. Ce même courant est, au contraire, diminué quand la grille est chargée par un pôle négatif. L'action de la troisième électrode a pour effet d'introduire ainsi une force électrique qui se compose avec la force électrique de la plaque, pour faire varier l'intensité du courant de plaque, comme le ferait un changement du nombre des éléments de la pile de plaque. La lampe à trois électrodes remplit divers rôles électriques dont le mécanisme repose sur le jeu de la troisième électrode.

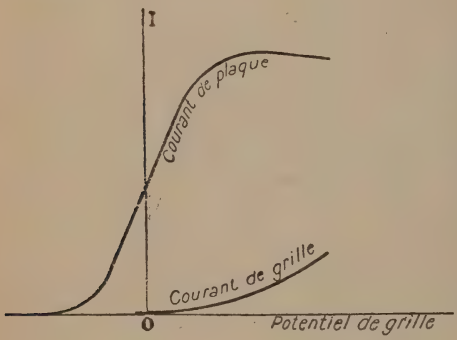

Fig. 58.

L'usage de la lampe à trois électrodes s'appuie sur une étude préliminaire des valeurs que prend l'intensité du courant de plaque, quand on augmente graduellement la charge électrostatique de la grille. La *courbe des intensités* du courant de plaque change aussi avec la température du filament et avec le potentiel de la plaque. La figure 58 se rapporte à un circuit de chauffage du filament où la force

électromotrice des accumulateurs est de 4,5 volts. Dans le *circuit plaque-filament*, la plaque *p* est reliée au pôle positif d'une pile P de 150 volts, le pôle négatif de cette pile est réuni, à travers un milliampèremètre A, à l'extrémité négative de la pile de chauffage du filament. Outre le circuit de chauffage et le circuit plaque-filament, il y a un troisième circuit, dit *circuit grille-filament* qui comprend une pile P' dont le nombre d'éléments varie ; un des deux pôles de cette pile est relié à la grille, tandis que l'autre est réuni par un conducteur à l'extrémité négative de la pile de chauffage du filament, au même point que le pôle négatif du circuit de plaque.

Dans ces conditions, on a observé les valeurs des intensités du courant au milliampèremètre du circuit plaque-filament, la charge de la plaque restant constante et positive, tandis qu'on fait varier la charge de la grille. Dans la figure 58, le potentiel de l'origine O des coordonnées est le potentiel du pôle négatif de la pile de chauffage du filament ; les abscisses sont les potentiels successifs de la grille, qu'on fait varier, de — 40 volts environ à + 40 volts ; les ordonnées sont les intensités du courant plaque-filament. La courbe, est appelée *courbe caractéristique*.

Lorsque le potentiel de la grille est notablement inférieur au potentiel de l'origine, il n'y a aucun courant de plaque. Le potentiel de la grille restant encore négatif, mais augmentant, il vient un moment où un courant apparaît dans le circuit plaque-filament, il augmente en même temps que le potentiel de la grille. Quand le potentiel de la grille est devenu voisin du potentiel négatif de chauffage, on voit un *faible* courant traverser le circuit grille-filament; ce courant augmente quand le potentiel de la grille continue à s'élever et il augmente alors en même

temps que le courant plaque-filament. Le courant plaque-filament atteint un maximum et devient sensiblement constant, alors que le courant de grille ne cesse pas d'augmenter.

La courbe caractéristique présente une portion moyenne, inclinée et rectiligne, limitée par deux portions courbes. Sur ces deux portions courbes, qui sont peu étendues, le courant de plaque croît plus vite que la charge ou le potentiel de la grille.

Suivant le mode d'emploi de la lampe, il y a lieu de rechercher, soit une proportionnalité du courant de plaque au potentiel de la grille, soit une variation du courant de plaque plus rapide que la variation du potentiel de la grille. A chacun de ces besoins correspond, pour le fonctionnement de la lampe, une région spéciale de la courbe caractéristique qui assure au courant de plaque les valeurs qui lui conviennent.

Usages de la lampe à trois électrodes

La lampe à trois électrodes a été appelée à remplir tour à tour les *trois rôles distincts* : d'amplificateur, de détecteur-redresseur et enfin de générateur d'ondes entretenues.

Pour ces trois rôles, la grille se prolonge, en dehors de l'ampoule, par un conducteur qui va au pôle négatif de chauffage du filament ; elle peut recevoir une charge d'une pile intercalée sur ce conducteur. En outre, le rôle auquel elle est appliquée fait aussi varier sa charge et par conséquent son potentiel. Pour introduire cette variation spéciale, le conducteur de communication, qui va de la grille au pôle

négatif de la pile de chauffage du filament, présente sur son trajet une *spirale*, qui aura pour fonction de communiquer à la grille une charge électrique, variable par la quantité et par le signe.

En raison de la *très faible capacité* de la partie libre de la grille, sa charge est modifiée d'une façon appréciable par une très petite variation d'un courant oscillatoire induit dans la spirale du circuit de grille. C'est à cette faible capacité que la lampe à trois électrodes doit sa sensibilité.

ROLE D'AMPLIFICATEUR

Le courant, dont on veut amplifier l'effet, passe dans une spirale S qui agit sur une spirale *s'* du circuit de grille. Les courants de la spirale S font naître, dans la spirale *s'*, (fig. 59) des courants qui accroissent alternativement les potentiels ou les charges électrostatiques de la grille. Il est possible de se placer dans des conditions telles que de petites variations de la charge de la grille, dues à des courants extraordinairement faibles, provoquent de *notables variations du courant de plaque*. On peut dire que le courant de plaque amplifie les variations de la charge de la grille. Ces courants de plaque produisent, en effet, sur un téléphone récepteur qui fait partie du circuit de plaque, des actions bien supérieures aux variations presque imperceptibles de la charge de la grille.

On obtient la meilleure amplification, quand le potentiel de la grille est voisin du potentiel négatif de la pile de

chauffage du filament. La courbe caractéristique du courant de plaque est, à ce moment, *très inclinée et rectiligne.* L'intensité du courant de plaque étant alors proportionnelle à la charge ou au potentiel de la grille, le courant amplifié n'est pas déformé.

La grille fonctionne, ainsi, comme un *relais*, qui fait intervenir dans un circuit différent du sien, une énergie étrangère au phénomène étudié, empruntée au courant de plaque. La dépense d'énergie du courant de grille étant alors sensiblement nulle, puisque l'intensité de ce courant est presque nulle, la grille se comporte comme un relais qui obéit sans inertie et par conséquent sans retard.

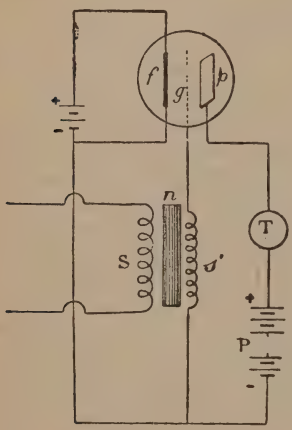

Fig. 59.

L'amplification ne s'applique pas seulement à des signaux radiotélégraphiques et à des conversations radiotéléphoniques, mais à des signaux et à des conversations de télégraphie et de téléphonie ordinaires. Au lieu de faire agir les courants directement sur un téléphone, ce qui serait illusoire, puisqu'ils sont trop faibles pour exercer une action suffisante, on les conduit dans la spirale primaire S d'un transformateur ; la spirale secondaire de ce transformateur est la spirale de grille s' d'une lampe à trois électrodes. Suivant le

cas, ce transformateur a un noyau de fer ou n'en a pas.

Si l'amplification par une seule lampe ne suffit pas, on a recours à des amplifications successives. A cet effet, on prolonge le circuit de plaque par la spirale primaire d'un nouveau transformateur, dont la spirale secondaire s'_2 est reliée à la grille d'une seconde lampe. C'est dans le circuit de plaque de cette seconde lampe que l'on place maintenant le téléphone, qui se trouvait antérieurement dans le circuit de plaque de la première lampe. De proche en proche, le

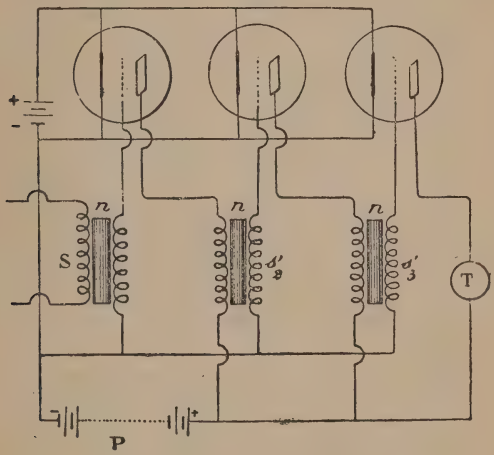

Fig. 60.

nombre des lampes amplificatrices est susceptible d'être augmenté (fig. 60). On rend ainsi appréciables au téléphone T des déplacements électriques qui auraient été absolument imperceptibles.

Jointe à la résonance, l'amplification a reculé d'une façon surprenante les limites de la réception en télégraphie.

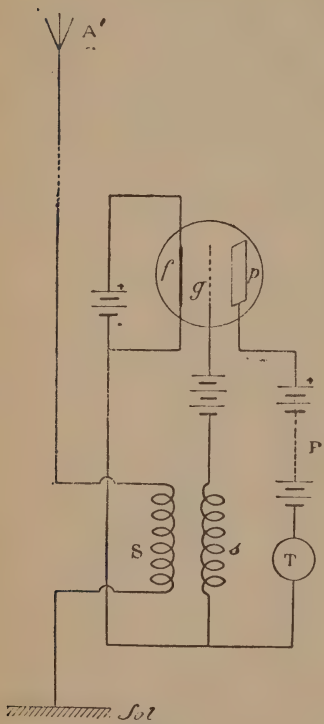

Fig 61.

ROLE DE DÉTECTEUR

Dans ce rôle, l'antenne de réception A' est mise en liaison, par une spirale S de sa base, avec une spirale *s* du circuit de grille qui est disposée en regard. Les trains d'oscillations, que l'antenne d'émission a provoqués dans l'antenne de réception, font naître des courants oscillatoires dans la spirale *s*, par l'induction qu'y exerce S (fig. 61).

L'abscisse Om (fig. 62) étant la valeur du potentiel qu'une charge constante donne à la grille. toute oscillation d'un courant oscillatoire qui circule dans la spirale *s*, y ajoute, par ses deux alternances, deux charges électrostatiques successives, *égales* et *contraires*. Comme à l'ordinaire, une charge

électrostatique positive de grille, résultant d'une alternance positive de la spirale *s*, renforce le courant de plaque de la lampe à trois électrodes. Pendant la demi période suivante, l'addition à la charge de la grille étant négative, le courant de plaque est réduit.

Le potentiel Om de la grille a augmenté de mm_1, par une charge positive et diminué d'une valeur égale mm_2 par la charge négative qui suit. Les intensités des courants de plaque pour les potentiels extrêmes de cette oscillation de la spirale sont M_1m_1 et M_2m_2.

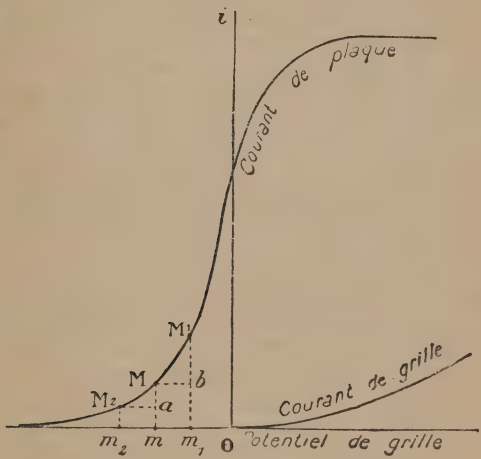

Fig. 62.

Si la courbe caractéristique était rectiligne au voisinage de M, les variations des ordonnées seraient égales

entre l'abscisse Om et les abscisses extrêmes Om_1 et Om_2, le téléphone ne parlerait pas. En effet, les courants que représentent les ordonnées se succèdent trop rapidement pour que chacun, séparément, écarte la membrane du téléphone de la position que lui donne l'intensité Mm du courant de plaque.

Il en est autrement, si l'on choisit convenablement le potentiel de la charge fixe de la grille. On fait en sorte que la région d'opération sur la caractéristique du courant de plaque soit une portion de cette courbe qui présente une courbure accentuée. L'augmentation $M_1m_1 - Mm$ est alors supérieure à la diminution $Mm - M_2m_2$ et chaque oscillation donne lieu à une augmentation résiduelle du courant de plaque. Cette augmentation se renouvelle à chaque oscillation induite. Pour l'ensemble des oscillations d'un *train*, il se produit alors un courant continu, qui est formé par une somme de courants résiduels de même sens.

L'arrivée de chaque signal, en augmentant ainsi, momentanément, l'intensité moyenne du courant de plaque, donne un choc au téléphone.

Pratiquement, on cherche sur la courbe caractéristique la position qui donne la plus forte audition des signaux.

La lampe à trois électrodes peut servir d'appareil détecteur dans des postes radiotélégraphiques de toute puissance.

ROLE DE GÉNÉRATEUR D'ONDES ENTRETENUES

Pour les postes à grande longueur d'onde, les oscillations sont entretenues par une machine à courants alternatifs

qui les produit directement. Pour les postes de faible puissance et même actuellement pour des postes moyens, des oscillations sont amorcées et entretenues par une lampe à trois électrodes dans le circuit oscillant de l'antenne d'émission.

Le mécanisme se conçoit facilement si l'on compare une antenne, mise en oscillation électrique, au système oscillant d'un pendule pesant que l'on a écarté de sa position d'équilibre.

Les oscillations d'un pendule s'amortissent plus ou moins vite. On est parvenu à maintenir leur amplitude constante en leur communiquant, en temps opportun, l'énergie d'une source auxiliaire, dont le pendule régularise lui-même l'intervention. C'est ainsi que le *balancier d'une horloge* dont le poids moteur ou le ressort est régulièrement remonté, est amené à osciller indéfiniment avec la même période et la même amplitude. Grâce à un *échappement* que conduit le pendule, le poids moteur ou le ressort, rendu libre, restitue au pendule, pendant la durée d'une demi-oscillation, en tombant ou en se détendant, l'énergie qui a été perdue en frottements pendant la demi-oscillation précédente. L'action du poids moteur ou du ressort est suspendue pendant la demi-oscillation qui suit. Les mêmes alternatives continuent.

Pour le circuit oscillant d'une antenne, la grille peut jouer le rôle de l'échappement, en ouvrant et fermant alternativement le circuit plaque-filament. La pile qui charge la plaque fournit périodiquement de l'énergie au système électrique oscillant, comme le poids moteur ou le ressort en fournit au pendule.

Dans une lampe à trois électrodes qui doit fournir des oscillations entretenues, le courant de plaque circule dans

une spirale S de la base de l'antenne d'émission (fig. 63) Au moment de la fermeture, par un manipulateur M, du circuit de la pile de plaque. le passage brusque du courant de plaque donne naissance à une self-induction dans la spirale S, et le circuit oscillant de la base de l'antenne entre en oscillation avec sa période propre, comme un pendule qu'un choc a écarté de sa position d'équilibre. Les oscillations qui parcourent, à ce moment, S, font naître par induction des oscillations dans la spirale *s* de grille.

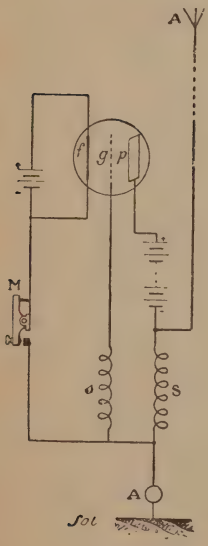

Fig. 63.

Les charges alternatives correspondantes de la grille font varier son potentiel. Une charge électrostatique positive de la grille, résultant d'une alternance positive de la spirale *s*, renforce le courant de plaque de la lampe, ce qui accroît l'amplitude du courant oscillatoire du circuit oscillant et de l'antenne. Le courant de plaque est moindre pendant la demi-période suivante où la grille est négative. Les variations du courant ont la période des oscillations de l'antenne.

L'accroissement d'énergie communiqué à l'antenne, pendant la demi période de renforcement, *peut compenser* la perte d'énergie qui a lieu. dans le circuit de l'antenne, pendant une oscillation complète, à la fois, par le rayonnement et par la chaleur que dégage la propagation du courant dans les conducteurs.

Les oscillations ne peuvent être entretenues, que si les sens des enroulements sont convenables sur S et sur *s*; une étude minutieuse permet de calculer les valeurs qu'il faut donner, pour le règlage, aux capacités, aux self-inductions et au pouvoir amplificateur.

Un ampèremètre A, placé en série sur le conducteur qui va de l'antenne à la terre, donne une déviation lorsque les oscillations sont amorcées et entretenues dans l'antenne.

Pour transmettre des signaux Morse avec une lampe générateur d'ondes entretenues, on fait des émissions à l'aide d'un manipulateur M que l'on dispose de façon à produire brusquement les oscillations (fig. 63).

On dispose à la place du manipulateur un microphone en dérivation, s'il s'agit de téléphonie.

Puisqu'une lampe à trois électrodes peut être une source d'oscillations entretenues, on l'emploiera, en particulier, d'une façon avantageuse, comme *hétérodyne* dans une réception.

TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL.

La conductibilité intermittente d'un radioconducteur n'avait pas seulement pour application l'inscription d'un signal, elle donnait aussi le moyen de commander à distance, à un instant donné, soit un effet direct d'un courant, calorifique, lumineux, magnétique, soit une action mécanique quelconque que permet l'emploi d'un électroaimant.

On peut affirmer, d'une manière générale, que tout appareil qui obéit à un courant continu, par des fils de ligne, est susceptible, *quel que soit l'agencement des organes*, de fonctionner par un courant alternatif de haute fréquence se propageant dans l'espace entre deux antennes, sans qu'il y ait à modifier sa constitution. Le passage d'une commande par fil de ligne à une commande sans fil de ligne n exige, en définitive, qu'un changement du courant de transmission. Les conditions qui président à la propagation de trains d'oscillations électriques entre un poste transmetteur et un poste récepteur sont. en télémécanique sans fil. les mêmes qu'en télégraphie sans fil.

La conductibilité d'un radioconducteur à un poste de réception, provoquée par des ondes électriques issues d'un poste d'émission, entraîne, *par l'intermédiaire d'un relais*, comme pour l'inscription d'un signal, dans un circuit local agencé à l'avance. les mêmes déclanchements que ceux que l'on est capable de réaliser au moyen d'une commande par fil de ligne.

L'opérateur du poste transmetteur agit sur un poste

récepteur où tout a été préparé et où personne n'a à intervenir ; il produit les différents effets dans un ordre préalablement organisé et *dont il a été le maître*, les laisse persister pendant un temps arbitraire, les suspend à volonté. Des *appareils de sécurité* peuvent avoir été installés pour préserver d'effets dus à des commandes perturbatrices. Le poste de réception peut être fixe, mais il peut aussi être mobile, navire ou avion. Une *télégraphie* sans fil, *automatique*, fonctionnant au poste de réception, signale au poste de commande l'exécution des effets à mesure qu'ils sont obtenus.

Un contact sensible redresseur, tel qu'un contact : *galène, fil de platine*, ne peut être utilisé seul, en Télémécanique sans fil, comme l'est un radioconducteur, car le courant qu'il laisse passer n'a pas une puissance suffisante pour mettre en action un relais. Mais les propriétés des lampes à vide à trois électrodes ont apporté à la Télémécanique de nouvelles et précieuses ressources, pour la réalisation et la protection des commandes. En effet, l'*amplification* par les lampes permet de faire fonctionner un relais. D'autre part, la sureté de leur emploi a fait faire de grands progrès à l'établissement de résonances entre l'émission et la réception et a permis d'assurer la protection, sans apporter un trop grand retard à l'exécution.

Comme le transmetteur et le récepteur peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre sans que leur liaison soit rompue, la télémécanique sans fil est devenue apte à de multiples emplois aussi bien au point de vue militaire qu'au point de vue industriel, dans les conditions les plus variées.

Bien entendu, dans la télémécanique sans fil, *il n'est pas question d'une transmission d'énergie à distance*. L'énergie

est localisée au poste d'exécution, elle y a été préparée et elle y est utilisée, elle ne vient pas du poste de commande. Si, au poste de commande, on met quelquefois en jeu une grande puissance, afin d'agir au loin, il n'en parvient qu'une fraction minime au poste de réception, tout juste assez pour faire fonctionner un relais. La puissance considérable du poste d'émission est disséminée dans l'espace.

TÉLÉPHONIE SANS FIL.

La téléphonie étant une variété de la télégraphie, on a dû concevoir une téléphonie sans fil dans laquelle une antenne d'émission agissait sur une antenne de réception, mais la réalisation en a été longtemps retardée. Cela provenait de la nécessité d'obtenir, pour la téléphonie sans fil, la persistance du courant alternatif qui devait franchir l'intervalle des deux antennes.

Au début, les seuls courants alternatifs qui possédaient une fréquence suffisante, pour permettre la commande d'effets sans fil de ligne, étaient des décharges de condensateur. Mais, si rapprochées qu'elles fussent, ces décharges étaient restées beaucoup trop intermittentes. Les courants alternatifs d'une décharge isolée ne comprennent, en effet, qu'un nombre trop restreint d'oscillations et la durée de ces oscillations n'est qu'une très faible fraction de l'intervalle de temps qui sépare deux décharges.

La brièveté d'une décharge était sans importance en télégraphie sans fil, avec l'usage d'un alphabet, où les signaux sont des combinaisons de points plus ou moins rapprochés. Il suffit alors que le courant ait lieu au moment même où l'on provoque un signal, et ce courant peut n'avoir qu'une durée extrêmement courte, s'il est suffisamment fort. Lorsqu'il s'agit de reproduire, avec ses modulations, une parole qui frappe un microphone, le courant qu'elle doit modifier, par ses vibrations, a besoin d'être maintenu. L'excitation par des étincelles ordinaires de

décharges de condensateurs ne pouvait pas convenir en radiotéléphonie.

Des oscillations électriques de haute fréquence, d'amplitude uniforme, *entretenues* par un procédé quelconque dans une antenne d'émission, se prêtent immédiatement aux transmissions radiotéléphoniques. En particulier, les lampes à trois électrodes constituent des émetteurs d'onde qui remplissent les conditions exigées.

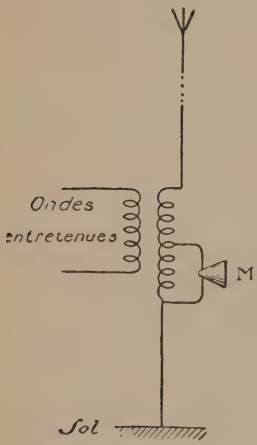

Fig. 64.

Dans un poste d'émission à oscillations entretenues, le microphone M devant lequel on parle, est placé en dérivation sur quelques tours d'une *spirale* qui fait partie de l'antenne d'émission (fig. 64).

Quand le microphone n'est influencé par aucun bruit, les oscillations électriques de la source à haute fréquence, qui circulent dans l'antenne, gardent une amplitude constante. Vu leur haute fréquence, elles sont sans action sur le téléphone du poste récepteur.

Vient-on à parler devant le microphone, les variations de résistance des contacts qui, dans la téléphonie ordinaire, substitueraient une courbe microphonique à la ligne horizontale d'un courant continu, exercent ici une action analogue. Elles imposent à la succession des oscillations de haute fréquence de la spirale et, par conséquent aussi de l'antenne, des ondulations microphoniques. Ces ondula-

tions sont de même fréquence que les ondes sonores.

Elles s'adressent aux deux alternances des oscillations de l'antenne (fig. 65).

Par induction à distance, d'antenne d'émission à antenne de réception, à travers le milieu qui sépare les deux postes, le courant oscillatoire modifié par le microphone est reproduit, avec sa période, si les deux circuits en correspondance sont accordés, et les oscillations de haute fréquence de l'émission font naître des oscillations correspondantes de réception (fig. 65). Celles-ci circulent

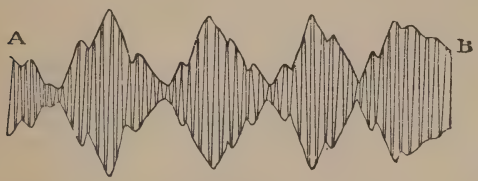

Fig. 65.

dans une dérivation où un détecteur les redresse. Les courants *redressés* parcourent le fil d'un téléphone qui répète la parole sans déformation. Insensible à la haute fréquence des oscillations qui transportent les courbes microphoniques, en leur servant de support, la membrane du téléphone obéit à la basse fréquence des ondulations de ces dernières.

A la réception, la téléphonie sans fil est plus simple que la télégraphie sans fil par ondes entretenues, car elle n'exige ni appareil tranchant régulièrement le courant alternatif un grand nombre de fois par seconde, ni hétérodyne. Le poste récepteur est le même que celui de la télégraphie sans fil par étincelles ou par ondes amorties (fig. 47). Le

détecteur employé est indifférent : ce sera, si l'on veut, un détecteur à galène ou une lampe à trois électrodes.

Les bruits parasites sont plus gênants qu'en télégraphie, car il est moins aisé de suivre les modulations de la voix que de percevoir les signaux Morse.

La portée directe est moindre qu'en télégraphie sans fil. Cela s'explique. En radiotélégraphie, la transmission par trains égaux donne à tous les signaux la même intensité. En radiotéléphonie, certaines syllabes qui impressionnent peu les microphones, sont perçues plus difficilement que d'autres. On augmente toutefois la portée en faisant usage d'amplificateurs.

La *radiotéléphonie* a un grand avantage sur la radiotélégraphie ; elle s'exprime, en effet, en langage clair, elle n'exige pas la connaissance des signaux Morse et l'habitude de la lecture au son. *Sans apprentissage*, les marins, les aviateurs, les particuliers peuvent recevoir directement les nouvelles. La radiotéléphonie est, pour cette raison, appelée à remplacer dans un grand nombre de cas la radiotélégraphie. D'autre part, les auditions lyriques et musicales par téléphonie sans fil sont fort appréciées.

DIRECTION D'UN RAYONNEMENT ÉLECTRIQUE.

Diriger, d'une part, un rayonnement électrique pour le concentrer et, d'autre part, reconnaître la position d'une source de rayonnement électrique, sont deux problèmes qui forment l'objet de la *radiogoniométrie*. Ils apparaissent, tout d'abord, plus compliqués que les problèmes optiques correspondants. Ils ont pu cependant être résolus et ils le sont dans des circonstances où la lumière trouverait des obstacles insurmontables.

Un faisceau de radiations électriques n'a qu'une bien faible énergie si sa longueur d'onde est inférieure à 300 m. Si l'on voulait alors, à l'aide de miroirs ou de lentilles, le concentrer pour lui donner une intensité suffisante dans une direction déterminée, comme on le fait pour des rayons lumineux, les dimensions exceptionnelles que devraient avoir les miroirs et les lentilles rendraient leur utilisation impraticable. Il en est déjà ainsi pour des rayons électriques dont la longueur d'onde a une dizaine de mètres ; les procédés optiques de concentration et de direction ne pourraient servir, par conséquent, que pour des sources électriques de trop minime puissance.

On s'est borné, pour diriger les rayons électriques, à faire usage d'antennes et de cadres.

Une règle générale, précédemment énoncée, sera d'abord utilement rappelée. Une forme de circuit, qui émet, dans une direction déterminée, un rayonnement électrique plus intense

que dans toute autre, a aussi un pouvoir collecteur plus grand pour cette même direction. C'est de cette façon qu'on fait servir, dans les stations, une même antenne pour la transmission et pour la réception. L'application de cette règle facilite l'énoncé des lois.

ANTENNES

Il n'est pas douteux qu'une antenne symétrique, telle qu'une antenne verticale et cylindrique, dissémine son rayonnement également en tous sens. Elle convient donc pour atteindre des postes mobiles dont la position est ignorée. En cas de postes fixes en correspondance, il y a économie d'énergie radiante et le secret est susceptible d'être mieux assuré, si l'on est maître d'imposer une direction au rayonnement. Une antenne dissymétrique le permet.

Il a été reconnu qu'une *antenne d'émission coudée*, formée d'une courte branche verticale plongeant dans le sol, suivie d'une longue branche horizontale libre, envoie un rayonnement *maximum dans le plan des deux branches* et dans le sens de l'extrémité mise à la terre.

Dans ce cas, si une antenne verticale est utilisée comme récepteur, le maximum de réception a lieu quand l'antenne verticale est dans le plan de l'antenne coudée, mais il vaut mieux prendre pour antenne réceptrice une antenne coudée qui est également dissymétrique pour la réception.

Avec une antenne verticale pour excitateur, si l'on prend comme récepteur une antenne coudée horizontalement, et, si l'on fait tourner la branche horizontale dans un plan

horizontal autour de l'extrémité qui plonge en terre, la réception est maximum lorsque le plan vertical de l'antenne de réception contient l'antenne d'émission.

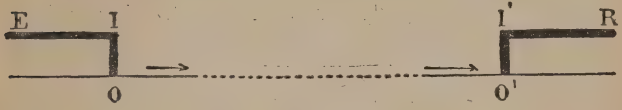

Fig. 66.

Les meilleures conditions de correspondance, réalisées pour l'émission et la réception entre deux antennes coudées, sont celles où les deux antennes sont dans le même plan, avec leurs deux extrémités libres dirigées en sens inverse l'une de l'autre (fig. 66). Les extrémités mises à la terre se font face.

CADRES

Pour émettre des radiations dans une direction déterminée, ou pour repérer la position de postes radiotélégraphiques, on fait actuellement le plus souvent usage de circuits fermés verticaux qu'on peut orienter. Ce sont des cadres habituellement rectangulaires ABCD, symétriques par rapport à un axe vertical, autour duquel

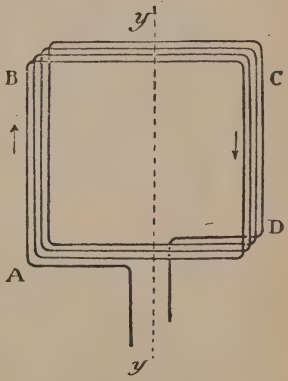

Fig. 67.

ils peuvent tourner (fig. 67). Sur le cadre on a enroulé un nombre suffisant de spires d'un fil conducteur que parcourt un courant alternatif de haute fréquence ; une capacité variable, annexée au cadre, permet de fixer la période du circuit.

Un cadre tournant peut, comme on va le voir, remplacer une antenne coudée.

Un *cadre envoie un flux maximum dans son plan* ; le flux qu'il émet dans une direction perpendiculaire à son plan est nul ; comme celles d'une antenne, ses radiations sont reçues par tous les temps et à travers les obstacles.

Pour repérer la direction d'émission d'un poste de télégraphie sans fil, on fait usage, au poste d'observation, d'un cadre rectangulaire. Les extrémités du fil du cadre sont branchées à un appareil récepteur. On cherche, en le faisant tourner, l'orientation qu'il faut lui donner, pour avoir le maximum, puis le minimum d'audition du poste émetteur (fig. 68). Un cadre fermé qui remplit le rôle d'antenne réceptrice reçoit, en effet, avec une intensité maximum, les rayonnements qui sont situés dans son plan.

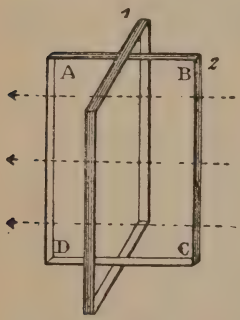

Fig. 68.

On trouve que le pouvoir rayonnant d'un cadre émetteur, ou bien le pouvoir collecteur d'un cadre récepteur, est proportionnel à la surface du cadre et au carré du nombre des spires qui l'entourent.

Un cadre a un *faible pouvoir rayonnant* et un *faible pouvoir collecteur*. En effet, sa longueur étant trop petite

par rapport aux longueurs d'ondulation émises, les effets des courants latéraux s'annulent presque pour toute orientation. On comprend alors qu'il a été nécessaire d'établir, tout d'abord, la résonance entre l'émission et la réception. Il a fallu, en outre, à la réception recourir à l'amplification. Associée à la *résonance*, l'*amplification* permet de recevoir, sans antenne, des messages venus de très loin. On avait, au début, fait usage, à cet effet, de cadres de grandes dimensions, dont le maniement était difficile · grâce à l'amplification, des cadres de dimensions moyennes sont devenus suffisants.

Deux directions étant nécessaires pour déterminer un point par leur intersection, la direction signalée par un seul cadre ne fixe pas la position d'un poste. En outre, la direction fournie par un cadre n'étant qu'approximative, il convient de combiner les indications qui sont trouvées avec plusieurs cadres goniométriques convenablement espacés. En marquant sur une carte la position des différents récepteurs et en traçant les orientations des maxima de réception observés, *le point de concours* de ces directions détermine le siège du poste émetteur.

Applicable à la recherche de postes fixes ou mobiles, cette méthode est particulièrement intéressante pour faire connaître la position de navires, de sous-marins, de dirigeables, s'ils lancent, *eux-mêmes*, des signaux radiotélégraphiques.

Par exemple, un navire qui fait usage de son poste peut être repéré d'après les signaux que des stations côtières en ont reçus. Réciproquement, à bord, on détermine la direction de signaux qui émanent de stations fixes connues, et, on en tire la position géographique du navire.

Si le navire ne dispose pas lui-même de cadres radiogo-

niométriques et n'est muni que d'un simple poste de télégraphie sans fil, il ne déterminera pas lui-même sa propre position, mais comme il a pu être repéré, sur sa demande, par des stations côtières, l'indication de sa position lui sera transmise, à une heure convenue, par les postes qui ont reçu ses signaux.

Les mêmes opérations peuvent se faire avec un dirigeable.

LE PRÉSENT ET L'AVENIR DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL.

L'exposé sommaire des principes et des procédés de la Télégraphie sans fil fait voir que, si le nouveau mode de communication à distance a utilisé avantageusement pour son organisation des connaissances antérieurement acquises, les besoins de son fonctionnement régulier ont, eux-mêmes, suscité des recherches qui ont contribué à étendre le domaine scientifique. C'est qu'en effet, si la science pure mène à des applications profitables, ces applications provoquent, en retour, des progrès de la science proprement dite.

La télégraphie par induction électrique, pratiquement instantanée, sans lien matériel visible entre deux stations, effectuée avec des courants d'émission alternatifs et périodiques, dont la longueur d'onde est comprise entre 150 mètres et 30 kilomètres, a conduit à des résultats inattendus et mis en œuvre des appareils révélateurs et amplificateurs dont la sensibilité a dépassé progressivement toutes les prévisions. On est parvenu à recueillir des émissions extrêmement faibles et à les séparer d'une infinité d'autres qui sillonnaient en même temps l'espace. Les faits ayant devancé la théorie, le rôle radiotélégraphique des hautes régions de l'atmosphère offre des incertitudes et de nouvelles recherches sont encore nécessaires.

L'entraînement a été immense au point de vue pratique, les stations météorologiques ne cessent de se multi-

plier. D'abord limitées au voisinage des côtes, elles ont gagné les régions intérieures des deux continents. Les postes moyens, dont la portée dépasse 1.000 kilomètres, se comptent actuellement par centaines.

De grands postes, tels que ceux de Paris, Lyon, Nantes, Croix d'Hins à Bordeaux, Sainte-Assise à Melun, en France ; puis Vienne, Moscou, Varsovie, Sofia, Rome, Belgrade, Nauen près de Berlin, Clifden en Irlande, pour ne citer que des postes d'Europe, entretiennent des correspondances constantes sur des rayons de plus de dix mille kilomètres. Quelques-uns de ces postes mobilisent des puissances motrices considérables, afin d'entretenir un rayonnement électrique intense. Ils dispersent ce rayonnement par des centaines de fils d'antennes que soutiennent d'énormes pylônes. Les prises de terre correspondantes se font par des réseaux métalliques qui occupent sur le sol des surfaces très étendues. Pour une portée qui n'est que peu inférieure à celle des plus grands postes, la tour Eiffel, haute de 300 mètres, n'emploie qu'une moyenne puissance motrice et son antenne n'a que six fils ayant chacun 500 mètres de longueur ; la tour leur sert de support. Les signaux de la tour Eiffel couvrent actuellement l'Europe, le nord de l'Afrique ; ils vont au Canada. Les communications de la métropole avec les colonies sont assurées par des postes installés en Afrique, en Indo-Chine. Pour des distances qui doivent dépasser notablement la portée de la tour Eiffel, la nouvelle station qui vient d'être aménagée à Sainte-Assise, près de Melun, utilise une antenne supportée par 17 pylônes, hauts de 250 mètres, occupant, dans leur ensemble, une surface de 180 hectares.

A la station transcontinentale du Centre radioélectrique

de Sainte-Assise, la puissance dans l'antenne d'émission est de 1.500 kilowatts.

Grâce à l'amplification, la portée s'étend sans limites à la surface de notre globe et les dépêches parviennent sans relais aux antipodes [1].

SÉCURITÉ APPORTÉE A LA NAVIGATION

La radiotélégraphie, intéressante déjà par les distances considérables qui sont franchies, tire sa plus grande importance de ce que ses postes peuvent être mobiles sans cesser de rester en correspondance. De là résultent des services spéciaux rendus à la navigation, dans des circonstances où toute télégraphie était restée absolument impuissante.

Les lignes de transports maritimes possèdent, sur tous leurs navires, des postes de télégraphie sans fil pourvus d'antennes élevées le long des mâts. Ces postes restent en communication constante avec la terre, soit directement, soit par l'intermédiaire de navires en cours de route. Un bâtiment qui assure un service de passagers reçoit, chaque jour, les nouvelles du monde entier ; les voyageurs sont mis en mesure de maintenir leurs relations avec leurs correspondants.

La sécurité de la navigation, précédemment précaire, a été ainsi tout à coup extraordinairement accrue. Une longue traversée n'offre plus les mêmes incertitudes qu'autrefois, puisque l'isolement est supprimé si le navire est muni d'un poste radiotélégraphique. Les sauvetages dus

1. La perception des signaux a été trouvée meilleure à l'antipode d un point d émission qu'aux points voisins. Cela s'expliquerait en considérant que, pour parvenir à l'antipode, tous les chemins étant égaux sur la sphère terrestre les ondes de toute direction issues du point de départ s'y rencontreraient en concordance.

à la télégraphie sans fil ne se comptent plus. A maintes reprises, des appels réitérés, partis d'un bâtiment en perdition, et disséminés instantanément sur de très vastes espaces, ont fait connaître sa position géographique précise, les causes de sa détresse et ont permis de lui apporter un secours efficace.

Des réponses de diverses provenances sont, dans ce cas, successivement reçues, elles rassurent voyageurs et équipage ; les manœuvres qui peuvent éviter ou retarder l'abandon du bâtiment continuent à être exécutées sans trouble. Après quelques heures, parfois plus rapidement, plusieurs navires accourus de diverses directions, s'accordent pour associer leurs secours et recueillir, s'il y a lieu, les naufragés. La télégraphie sans fil ne s'est montrée impuissante que lorsque le bâtiment a sombré trop rapidement pour que l'utilisation des canots de sauvetage ait été possible.

Avec un rôle modeste, mais précieux, des postes radiotélégraphiques de faible portée, ou *radiophares*, échelonnés sur certaines côtes, au voisinage d'écueils et de passages dangereux, guident par des signaux spéciaux, répétés plusieurs fois par minute, des bâtiments égarés auxquels la brume cache les phares lumineux.

Les dirigeables et les avions étant actuellement munis d'appareils radiotélégraphiques, la sécurité de la navigation aérienne se trouve, elle aussi, considérablement améliorée.

SIGNAUX HORAIRES

Chacun sait combien est indispensable au marin la connaissance exacte de sa position en cours de route. Il a besoin,

pour la déterminer, de connaître la longitude et la latitude du lieu où il se trouve. Certaines observations astronomiques, qui lui sont familières, lui donnent la latitude ; il obtient de même aussi l'heure locale. La *longitude* se déduit, d'autre part, de la différence, à un même instant, entre l'heure locale et l'heure d'un méridien pris pour origine ; des montres de précision, que le navire a emportées et qui ont été réglées au départ, ont dû *conserver* l'heure d'un méridien connu. Mais la marche d'une montre n'est jamais rigoureusement régulière, et quelques secondes d'écart par jour conduiraient, en s'ajoutant pendant le cours du voyage, à un total qui pourrait n'être pas négligeable. Actuellement, des signaux lancés, chaque jour, par le poste radiotélégraphique de la tour Eiffel, à des heures fixes, font entendre, à toute distance en mer, l'heure exacte du méridien adopté pour origine. A ce moment, les marins rectifient l'heure des montres.

Des explorateurs en régions désertiques, munis d'appareils récepteurs portatifs de télégraphie sans fil, reçoivent également les signaux horaires de Paris et sont, ainsi, en mesure de déterminer la position géographique des points principaux de leur parcours.

Un signal du poste de la tour Eiffel est reçu presque *instantanément* à de très grandes distances, puisqu'il parcourt, à travers l'air, trois cents kilomètres en un millième de seconde.

Pour assurer la plus grande précision dans l'envoi des signaux horaires, une ligne souterraine à double fil, renfermant une pile, a été établie en permanence entre le pendule de l'heure à l'Observatoire de Paris et la station radiotélégraphique de la tour Eiffel. Le pendule lui-même, ferme au moyen d'un contact, le circuit de la ligne au moment qui convient. Le courant électrique, qui passe

alors dans la ligne, fait fonctionner par l'intermédiaire d'un relais, le manipulateur qui lance le signal horaire [1].

RENSEIGNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES

En dehors des signaux horaires, plusieurs postes et, en particulier, le poste de la tour Eiffel propagent des renseignements météorologiques qui font connaître, à une infinité de postes récepteurs, les mesures effectuées chaque jour, en certaines stations déterminées du globe, sur la *pression atmosphérique*, la *direction* et la *force du vent*, l'*état de la mer*. Ces indications permettent de se prémunir à temps contre les dangers de fortes perturbations. Des observations recueillies au large de l'Océan Atlantique sont également transmises aux continents.

A titre d'avertissements agricoles, il est utile de publier des probabilités relatives aux changements atmosphériques et à la prévision du temps. A cet effet, la tour Eiffel a organisé un service quotidien de renseignements par téléphonie sans fil. Chaque commune peut posséder un poste de réception, vu le prix peu élevé de son installation.

Les renseignements météorologiques sont particulièrement indispensables aux dirigeables et aux aéroplanes. Ils les engagent à avancer ou à reculer un départ. En cours de route, la recherche d'un lieu d'atterrissage est envisagée d'une façon prudente, sans précipitation, avant le déclanchement des troubles atmosphériques annoncés.

1. La réception des signaux horaires se fait avec une précision de l'ordre de 1,4 seconde de temps. Cette précision correspond à une centaine de mètres d'erreur possible sur une longitude.

Études météorologiques.

Si les communications radiotélégraphiques se trouvent de temps en temps fortement gênées par de brusques décharges atmosphériques, on conçoit que l'examen méthodique des signaux parasites eux-mêmes qui accompagnent ces décharges, pourra renseigner sur la production et la marche de certains troubles aériens ; il apportera peut-être d'utiles indications météorologiques.

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL EN TEMPS DE GUERRE

Le rôle de la télégraphie sans fil en *temps de guerre* est particulièrement important. Alors que les armées en campagne se déplacent, que les communications sont coupées, que des régions étendues sont bloquées, le fonctionnement de la télégraphie sans fil se présente comme indispensable et son emploi est incessant. Les troupes possèdent des postes mobiles auxquels est attaché un personnel exercé et il en est fait un large usage. Dans ce cas, les postes d'émission. à oscillations entretenues par des lampes à trois électrodes, et les postes de réception à hétérodyne sont avantageux.

La téléphonie sans fil est de même facile à réaliser avec un poste récepteur ordinaire et elle est, en maintes circonstances, préférable à la télégraphie sans fil. Sur mer, la transmission des ordres, entre navires de guerre. par radiotéléphonie, est commode et rapide.

La télégraphie sans fil prend part à la guerre de mouvements elle établit un *lien méthodique* entre les troupes

qui attaquent une position et les avions qui sont chargés de la reconnaître. L'aviateur repère les batteries, les ouvrages fortifiés, les rassemblements ; il en signale la situation à l'artillerie. Constatant ensuite les effets des projectiles qui ont été dirigés suivant ses indications, il renseigne sur les écarts à corriger. L'entente entre l'artillerie et l'aviation conduit à un rapide réglage des tirs.

Les communications lointaines par les lignes télégraphiques ordinaires étant coupées, la télégraphie sans fil a maintenu, pendant les hostilités, les relations de la France, de l'Angleterre, et de l'Italie avec la Russie, la Roumanie, les armées d'Orient.

ROLE COMPARÉ DES DEUX TÉLÉGRAPHIES

En *temps de paix*, la télégraphie ordinaire et la télégraphie sans fil sont-elles destinées à fonctionner en collaboration, ou à lutter pour une prééminence ?

Si l'on jette un coup d'œil d'ensemble sur les qualités et les défauts des deux télégraphies, on peut dire que la télégraphie avec fil de ligne satisfait aux exigences de la vie courante, partout où son service est régulièrement organisé. Entre les continents, un câble sous-marin remplit correctement sa mission, mais il offre l'inconvénient d'abandonner les messages au contrôle de la puissance à laquelle il appartient. En outre, en cas d'avaries, la réparation d'un cable risque quelquefois d'être longue et la radiotélégraphie intervient au moins alors en suppléance.

On prévoit que les progrès réalisés dans les communications radiotélégraphiques à très grande distance rendront superflue la pose de nouveaux cables transocéaniques. C'était de l'intensité et de la multiplicité des signaux pairastes que

provenait le principal obstacle apporté à la régularité de certaines transmissions sans fil. Or. en premier lieu, une amplification suffisante, par les lampes à vide, des oscillations recueillies par antennes ou par cadres, peut les faire distinguer des parasites perturbateurs. En second lieu, l'introduction dans les postes radiotélégraphiques à trafic important, d'une manipulation à grande vitesse, augmentera dans la proportion de cinq, par exemple, le nombre de mots transmis en une minute, sans qu'il y ait de changement dans le nombre de signaux parasites intercalés. D'ailleurs, de nouveaux procédés de résonance permettront probablement, dans un avenir prochain, de négliger les signaux parasites à la réception.

Enfin, dans de vastes régions continentales où des fils télégraphiques n ont pas encore été posés, dans certaines régions de l'Afrique et de l'Asie, en Amérique du Sud, la radiotélégraphie évitera les dépenses onéreuses de l'installation des fils et les difficultés de leur protection.

Si la télégraphie sans fil a des avantages précieux. elle a aussi des défauts qui ne sont pas négligeables. Le secret d'un message qui suit un fil de ligne paraît mieux assuré que s'il circule en tous sens à travers l'espace. En effet, si satisfaisante que soit la résonance. elle n'est pas discrète. Un opérateur exercé arrive très vite à dépister, avec son récepteur réglable, l'accord qui se rapporte à un poste et à capter ses communications. Un langage chiffré, à modifier de temps en temps, peut donc devenir indispensable.

MESURES DE CONTROLE

La télégraphie sans fil n'est-elle pas, susceptible de devenir dangereuse ? Si l'on a pu, en certains moments

d'inquiétude, considérer la surveillance des lettres et des télégrammes comme indispensable au point de vue de la sécurité nationale et sociale, la télégraphie sans fil est, plus que tout autre mode de correspondance, capable de se dérober à un contrôle. Chacun sait que la réglementation de la réception est illusoire. Si l'on y regarde de près, on se rend aussi aisément compte de la difficulté du repérage d'un poste expéditeur, s'il a un usage intermittent, s'il se déplace, s'il emploie une longueur d'onde variable. Son usage clandestin, par-dessus les frontières, au profit de ceux qui préparent la guerre en temps de paix ou qui soutiennent l'ennemi en temps de guerre, peut être redouté. Une organisation de *police de l'éther* est envisagée.

D'ailleurs, la télégraphie et la téléphonie sans fil ne sont pas les seules applications possibles de la conductibilité intermittente des contacts imparfaits. Elles ne sont qu'un cas particulier d'une radiotélémécanique féconde en ressources. Il paraît suffisamment démontré qu'en se mettant à l'abri des perturbations par des combinaisons appropriées, on est maître de faire fonctionner, sans que l'intervention d'opérateurs agissant localement au lieu d'exécution, soit nécessaire, des appareils de tout genre, agencés à l'avance et munis de leur source d'énergie. Les essais se sont jusqu'ici orientés vers des applications de guerre et on a proposé de diriger les évolutions de navires et d'aérostats non montés, plus ou moins chargés d'explosifs, dont la chute serait commandée, à un instant propice, au delà des frontières.

Des avions sans pilote ont été manœuvrés à grande distance, pendant plusieurs heures, le chemin qu'on leur a fait parcourir en maintenant l'équilibre et en assurant la direction a atteint plusieurs centaines de kilomètres.

Les applications de la télégraphie sans fil que l'avenir nous réserverait seraient donc spécialement dangereuses et il n'est pas superflu de les prévoir. Ce n'est là, à vrai dire, qu'une généralisation toute naturelle. Si la Science a réussi à augmenter, dans une très large mesure. le bien-être de l'humanité, elle est en même temps l'agent de destruction le plus puissant et le plus perfide.

Dans les cas particuliers visés ci-dessus, à défaut de moyens spéciaux de préservation contre des bombardements, on pourrait, à la rigueur, recourir à de puissants producteurs d'ondes entretenues qui rendraient illusoires, pendant le temps nécessaire, des commandes radio-électriques de tout genre, en les noyant dans d'incessants parasites.

Il est permis, d'ailleurs, d'espérer que la Science fournira elle-même des moyens efficaces pour se mettre en garde contre les dangers des nouvelles découvertes.

ABBEVILLE. — IMPRIMERIE F. PAILLART.

COLLECTION PAYOT

Nos 3-4.

RENÉ CANAT

Docteur ès-lettres. — Professeur de rhétorique supérieure au Lycée Louis-le-Grand

La Littérature Française
AU XIXe SIÈCLE

Présenter sous un format pratique et commode une histoire littéraire du XIXe siècle qui, vivement écrite et de lecture agréable, restât complète sous des apparences de résumé, tel est semble-t-il le but que M CANAT s'est efforcé d'atteindre ; et son petit livre sera bien accueilli non seulement des étudiants mais de tous les amateurs de littérature enchantés de cheminer derrière un critique sûr et par des voies déblavées dans la complexité des Ecoles littéraires contemporaines. *(L'Education)*

No 13.

ÉMILE BRÉHIER

Maître de Conférences à la Sorbonne.

Histoire de la Philosophie
ALLEMANDE

M. Émile BRÉHIER étudie avec une parfaite sérénité l'« HISTOIRE DE LA PHILOSOPHIE ALLEMANDE », et il reconnaît la place particulière que cette philosophie occupe dans la civilisation intellectuelle de l'Europe, entre l'empirisme anglais et le rationalisme français. *(L'Action Nationale.)*

COLLECTION PAYOT

Nos 25-26.

ETIENNE GILSON

Chargé de cours à la Sorbonne.

La Philosophie au Moyen âge

Ces deux volumes forment un ouvrage de toute première valeur : c'est non seulement l'histoire de la pensée philosophique au moyen-âge, mais la signification de cette pensée, sa fécondité incomparable, insoupçonnée qui sont étudiées en des pages pleines et denses qui raviront les lecteurs ordinaires et les spécialistes. *(Revue des Lectures.)*

Nos 23-24.

MAURICE CROISET

Membre de l'Institut. — Administrateur du Collège de France

La Civilisation hellénique

Un livre qu'on pourrait se dispenser de louer, car son auteur est connu pour être le plus savant helléniste de France.

GUY LAVAUD

Ayant passé sa vie entière dans le commerce intime et familier des grandes âmes de l'Hellade, M. Maurice CROISET était à même, mieux que tout autre, de nous tracer en deux petits volumes, avec le résumé succinct mais essentiel de ses longues recherches et de ses méditations, l'exposé le plus clair, le plus solide et le plus nourri que nous ayons jusqu'ici des lignes directrices selon lesquelles se forma, se développa et se diffusa jusqu'à nous tout ce que le génie grec versa d'idées, de suggestion, de sentiments et de beautés dans le vaste courant de la pensée humaine.

MARIO MEUNIER

PAYOT & Cie, 106, Boulevard Saint-Germain, PARIS

Collection "PETITE ANTHOLOGIE"

1. **Comment être heureux.** Pensées choisies par *Michel Epuy*. Petit in-16 broché. . . . . 2.—
Relié satinette. . . . . 7.—

2. **Les heures de l'amour.** Pensées choisies par *Michel Epuy*. Petit in-16 broché. . . . . 2.—
Relié satinette. . . . . 7.—

3. **Le livre de la nature.** Pensées choisies par *Michel Epuy*. Petit in-16 broché . . . . . 2.—
Relié satinette. . . . . 7.—

4. **Le livre de la sagesse.** Pensées choisies par *P. Salet*. Petit in-16 broché . . . . . 4.—
Relié satinette. . . . . 7.—

5. **Les paroles de Bouddha.** Choix et traduction par *P. Salet*. Petit in-16 broché . . . . . 4.—
Relié satinette. . . . . 7.—

6. **Les Upanishads.** Morceaux choisis par *P. Salet*. Petit in-16 broché . . . . . 3.—
Relié satinette. . . . . 7.—

7. **Le livre d'amitié.** Pensées choisies par *Michel Serlandes*. Petit in-16 broché. . . . . 3.—

8. **Les Yeux de l'Asie,** par *Rudyard Kipling*. Petit in-16 broché . . . . . 3.—
Relié satinette. . . . . 7.—

9. **Être humain,** suivi de **Quand un homme se trouve lui-même,** par *Woodrow Wilson*. Petit in-16 broché . . . . . 3.—

N° 22. A. BERTHOUD
Professeur de chimie-physique à l'Université de Neuchatel.
LA CONSTITUTION DES ATOMES

N°s 23-24. MAURICE CROISET
Membre de l'Institut, Administrateur du Collège de France
LA CIVILISATION HELLÉNIQUE
APERÇU HISTORIQUE

N°s 25-26. ÉTIENNE GILSON
Chargé de Cours à la Sorbonne, Directeur d'Études à l'École pratique des Hautes Études Religieuses
LA PHILOSOPHIE AU MOYEN AGE

N° 27. ÉDOUARD BRANLY
Membre de l'Institut
LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

N° 28. Dr CAPITAN
Membre de l'Académie de Médecine, Professeur au Collège de France et à l'École d'Anthropologie
LA PRÉHISTOIRE

N° 29. E. GARÇON
Professeur de législation criminelle et de droit pénal comparé à la Faculté de droit de l'Université de Paris
LE DROIT PÉNAL
ORIGINE — ÉVOLUTION — ÉTAT ACTUEL

N° 30. F. ROMAN
Chef des travaux de Géologie à l'Université de Lyon
PALÉONTOLOGIE ET ZOOLOGIE

N° 31. ALBERT GRENIER
Professeur d'Antiquités nationales et rhénanes à la Faculté des lettres de l'Université de Strasbourg
LES GAULOIS

N° 32. FÉLIX HENNEGUY
Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine
Professeur au Collège de France
LA VIE CELLULAIRE

N° 33. J. HATZFELD
Agrégé de l'Université
Ancien membre de l'École d'Athènes
HISTOIRE GRECQUE

N° 34. ADOLPHE DIEUDONNÉ
Conservateur adjoint au Département des Médailles et Antiques de la Bibliothèque nationale
LES MONNAIES FRANÇAISES

N°s 35-36. ÉDOUARD MONTET
Professeur de langues orientales à l'Université de Genève, Ancien Recteur
HISTOIRE DE LA BIBLE

N° 37. CHARLES DUGAS
Chargé de cours à l'Université de Montpellier, Ancien membre de l'École française d'Athènes
LA CÉRAMIQUE GRECQUE

N° 38. ED. MARCOTTE
Ingénieur-Constructeur de phares.
LA LUMIÈRE INTENSIVE

Dans les volumes de la *COLLECTION PAYOT*, des savants français résument la somme de leurs connaissances. *(La France)*.

PRINCIPAUX COLLABORATEURS DE LA « COLLECTION PAYOT »

HENRI ANDOYER, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.
PAUL APPELL, Membre de l'Institut, Recteur de l'Université de Paris.
L[t]-C[l] E. ARIÈS, Correspondant de l'Institut.
AUGUSTE AUDOLLENT, Doyen de la Faculté des Lettres de Clermont.
ERNEST BABELON, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France.
E. BAILLAUD, Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Paris.
LOUIS BARTHOU, de l'Académie Française, ancien Président du Conseil.
PAUL BECQUEREL, Docteur ès Sciences chargé d'Enseignement pratique à la Sorbonne.
GABRIEL BERTRAND, Professeur à la Sorbonne et à l'Institut Pasteur.
MAURICE BESNIER, Professeur à l'Université de Caen.
G. BIGOURDAN, Membre de l'Institut, Astronome de l'Observatoire de Paris.
F. BOQUET, Astronome de l'Observatoire de Paris.
Abbé J. BOSON, Docteur en Philologie orientale.
EDMOND BOUTY, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.
E. BRANLY, Membre de l'Institut, Professeur à l'Institut Catholique.
M. BRILLOUIN, Professeur au Collège de France.
Dr CAPITAN, Membre de l'Académie de Médecine, Professeur au Collège de France, Professeur à l'École d'Anthropologie.
J. CARCOPINO, Ancien Membre de l'École de Rome, Professeur à la Sorbonne.
EUGÈNE CAVAIGNAC, Professeur à l'Université de Strasbourg.
G. CHAUVEAUD, Directeur de laboratoire à l'École des Hautes-Études.
HENRI CHERMEZON, Chef de travaux à la Faculté des Sciences de Strasbourg.
HENRI CORDIER, Membre de l'Institut, Prof[r] à l'École des Langues orientales.
M. COURANT, Professeur à l'Université de Lyon.
MAURICE CROISET, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France.
ÉDOUARD CUQ, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté de Droit.
L. DAUPHINÉ, Docteur ès sciences, chargé d'Enseignement pratique à la Sorbonne.
MAURICE DELACRE, Membre de l'Académie Royale de Belgique, Professeur à l'Université de Gand.
M. DELAFOSSE, Ancien Gouverneur des Colonies, Professeur à l'École coloniale.
CH. DEPÉRET, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences de Lyon.
CH. DIEHL, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.
G. DOTTIN, Correspondant de l'Institut, Doyen de la Faculté des Lettres de Rennes.
ALBERT DUFOURCQ, Professeur à l'Université de Bordeaux.
CH. DUGAS, Professeur à l'Université de Montpellier.
JEAN DUHAMEL, Secrétaire du Comité Central des Houillères de France.
Comte P. DURRIEU, Membre de l'Institut, Conservateur honoraire au Louvre.
RENÉ DUSSAUD, Conservateur au Louvre, Professeur à l'École du Louvre.
CAMILLE ENLART, Directeur du Musée de Sculpture Comparée.
Cte ÉMILE ESPÉRANDIEU, Membre de l'Institut.
P. FABIA, Correspondant de l'Institut, Professeur à l'Université de Lyon.
HENRI FOCILLON, Professeur à la Faculté des lettres de l'Université de Lyon.
E. GARÇON, Professeur de législation criminelle et de droit pénal comparé à la Faculté de droit de l'Université de Paris.
G. FOUGÈRES, ancien Directeur de l'École d'Athènes, Professeur à la Sorbonne.
E.-F. GAUTIER, Professeur à la Faculté des Lettres d'Alger.
PAUL GIRARD, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.

PRINCIPAUX COLLABORATEURS DE LA « COLLECTION PAYOT »

GUSTAVE GLOTZ, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne
A. GRENIER, Professeur à l'Université de Strasbourg.
PIERRE GRILLET, Agrégé de l'Université.
GEORGES GROMAIRE, Professeur au Lycée Buffon.
A. GUILLAND, Professeur à l'École Polytechnique de Zurich.
J. HATZFELD, Professeur à l'Université de Bordeaux.
L. HAUTECŒUR, Professeur à l'Université de Caen.
HENRI HAUVETTE, Professeur à la Sorbonne.
FÉLIX HENNEGUY, Membre de l'Institut, Membre de l'Académie de Médecine.
PIERRE JOUGUET, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.
G. LACOUR-GAYET, Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique.
A. LACROIX, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.
L. DE LAUNAY, Membre de l'Institut, Professeur à l'École des Mines.
G. LE CARDONNEL.
G. LE GENTIL, Professeur à la Sorbonne.
PH.-E. LEGRAND, Correspondant de l'Institut, Professeur à l'Université de Lyon.
ED. LE ROY, Membre de l'Institut.
S. LÉVY, Professeur au Collège de France.
MAURICE LIBER, Professeur suppléant à l'École des Hautes-Études.
H. LOISEAU, Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Toulouse.
LÉON MAQUENNE, Membre de l'Institut, Professeur au Muséum.
JULES MARTHA, Professeur à la Sorbonne.
ANGEL MARVAUD, Docteur en droit.
PAUL MASQUERAY, Professeur à l'Université de Bordeaux.
Dr LUCIEN MAYET, Professeur à l'Université de Lyon.
A. MEILLET, Professeur au Collège de France.
L. MÉRIDIER, Professeur à la Sorbonne.
HENRI MÉRIMÉE, Professeur à l'Université de Toulouse.
ÉMILE MEYERSON.
PAUL MONCEAUX, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France.
A. MORET, Dr du Musée Guimet, Directeur à l'École des Hautes-Études
GABRIEL MOUREY, Conservateur des Palais Nationaux.
O. NAVARRE, Professeur à l'Université de Toulouse.
PAUL PELLIOT, Professeur au Collège de France.
ANDRÉ PIRRO, Professeur à la Sorbonne.
HENRY PRUNIÈRES, Docteur ès lettres, Directeur de la *Revue Musicale*.
THÉODORE REINACH, Membre de l'Institut.
CHARLES RICHET, Membre de l'Institut et de l'Académie de Médecine.
LÉON ROBIN, Professeur à la Sorbonne.
F. ROMAN, Chef des Travaux de géologie à l'Université de Lyon,
FIRMIN ROZ.
J. SABATIÉ, Professeur à l'École Supérieure de Commerce et d'Industrie.
WILLIAM SAVAGE, Professeur au Lycée Buffon.
Père SCHEIL, Membre de l'Institut, Directeur à l'École des Hautes-Études
RENÉ SCHNEIDER, Professeur à l'Université de Paris.
F. SPENLÉ, Professeur à l'Université de Strasbourg.
E. TONNELAT, Professeur à l'Université de Strasbourg.
J. [illegible]N, Dir[illegible] Hautes-Ét[illegible]

Fo[illegible] 25,000 [illegible]n. '17